



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

***DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH PADA SISTEM DENGAN  
WIND TURBINE DAN MEDIA PENYIMPANAN ENERGI  
MEMPERTIMBANGKAN ENERGY CYCLE LIMIT***

Galih Budi Virgiansyah  
NRP 2213100127

Dosen Pembimbing  
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.  
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE141599**

***DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH ON SYSTEM WITH WIND  
TURBINE AND ENERGY STORAGE SYSTEM CONSIDERING  
ENERGY CYCLE LIMIT***

Galih Budi Virgiansyah  
NRP 2213100127

Supervisor  
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.  
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT  
Faculty of Electrical Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2017

## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “*Dynamic Economic Dispatch pada Sistem dengan Wind Turbine dan Media Penyimpanan Energi Mempertimbangkan Energy Cycle Limit*” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap dalam daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 24 Juli 2017

Galih Budi Virgiansyah  
(2213 100 127)

**DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH PADA SISTEM DENGAN WIND  
TURBINE DAN MEDIA PENYIMPANAN ENERGI  
MEMPERTIMBANGKAN ENERGY CYCLE LIMIT**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.

NIP. 19741129 200012 1 001

Dedet C Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

NIP. 19731119 200003 1 001

**SURABAYA**  
**JULI, 2017**

# ***DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH PADA SISTEM DENGAN WIND TURBINE DAN MEDIA PENYIMPANAN ENERGI MEMPERTIMBANGKAN ENERGY CYCLE LIMIT***

Nama Mahasiswa : Galih Budi Virgiansyah  
NRP : 2213100127  
Dosen Pembimbing I : Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.  
NIP : 19741129 200012 1 001  
Dosen Pembimbing II : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.  
NIP : 19731119 200003 1 001

## **ABSTRAK**

Kebutuhan daya listrik yang semakin meningkat seiring berkembangnya jaman berbanding terbalik dengan ketersediaan sumber energi yang tidak dapat diperbaharui seperti minyak dan batu bara. Adanya inovasi dengan pengoptimalan energi terbarukan yang mulai digunakan menjadi solusi dari permintaan kebutuhan daya listrik yang semakin tinggi. Dengan cakupan wilayah yang semakin luas, juga diperlukan pembangkit tenaga listrik yang mampu untuk memenuhi permintaan tersebut. Berbanding lurus dengan permintaan daya listrik, suatu sistem diharapkan mampu menyuplai beban dengan optimal dan ekonomis. Dengan penggunaan *Dynamic Economic Dispatch (DED)*, suatu pembangkit dapat dioptimalkan agar diperoleh biaya pembangkitan yang minimal terhadap permintaan daya listrik. Pada penelitian ini, digunakan perhitungan menggunakan file Matpower yang ada pada MATLAB dengan metode *quadratic programming*. Batasan yang dimasukkan adalah terkait keseimbangan daya pembangkit, ramp rate ataupun charging discharging yang ada pada media penyimpanan energi (baterai). Penelitian ini diharapkan mampu diperoleh pengaruh penambahan pembangkit renewable terhadap total biaya pembangkitan dan mengetahui lifetime dari baterai dari sistem tenaga listrik. Dan didapatkan biaya pembangkitan yang lebih murah ketika terdapat adanya penambahan wind turbine dan media penyimpanan energi yang ada pada sistem dibandingkan dengan sistem awalnya.

**Kata kunci : DED, Batasan Operasi, Quadratic Programming  
Lifetime baterai**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# ***DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH ON SYSTEM WITH WIND TURBINE AND ENERGY STORAGE SYSTEM CONSIDERING ENERGY CYCLE LIMIT***

Name : Galih Budi Virgiansyah  
NRP : 2213100127  
Supervisor I : Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.  
NIP : 19741129 200012 1 001  
Supervisor II : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.  
NIP : 19731119 200003 1 001

## **ABSTRACT**

The needs of an ever increasing electrical power over the development of the era is inversely proportional to the availability of energy resources that are not renewable as oil and coal. Innovations with the optimisation of renewable energy that are used into solution from the electric power needs demand increasingly high. With an increasingly wide area coverage, also required the power plants to be able to fulfill the request. Directly proportional to the demand for electrical power, a system expected to supply the load with optimal and economical. With the use of *Dynamic Economic Dispatch (DED)*, a plant can be optimized so that minimal power generation costs accrued against the electric power demand. In this research, used a calculation using file Matpower on MATLAB with *quadratic programming* method. Restrictions included the balance of power generators, ramp rate or charging discharging on the energy storage system (battery). This research is expected to obtain the influence of addition of renewable generation to the total cost of generation and find out the lifetime of the battery from the power system. And it brings the cost of the cheaper generation when there is the presence of the addition of the wind turbine and energy storage medium that exists on a system as compared with the system initially.

**Keywords : *DED, Operating Limits , Quadratic Programming  
Battery Lifetime***

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat yang telah diberikan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan penelitian ini sebagai tugas akhir dalam menyelesaikan jenjang studi S1 pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini penulis mengucapkan terimakasih banyak atas segala bantuan, bimbingan, dan dukungan yang telah diberikan, kepada:

1. Orang tua saya dan keluarga, terutama ayahanda tercinta Eko Budi Harsono yang selalu memberikan support dalam pengerjaan tugas akhir ini.
2. Dr. Rony Seto Wibowo ST., MT. selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing II Tugas Akhir yang telah memberikan arahan, masukan, saran serta bimbingan selama pengerjaan tugas akhir dan selama perkuliahan di Teknik Elektro.
3. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah membantu memfasilitasi kegiatan belajar mengajar selama perkuliahan.
4. Mbak Annisa Taradini, Yoanes Bagus, Fiona Yunita dan Hilmy Kharisma sebagai tim bimbingan Pak Roni yang selalu membantu saya dalam pengerjaan tugas akhir ini.
5. Teman teman E53 selaku keluarga besar angkatan pertama kali di Teknik Elektro ITS.
6. Mahasiswa member dan lab PSSSL yang telah menjadi teman bercanda disela-sela pengerjaan tugas akhir.
7. Indra, Bibur, Rona, Aris, Kamil, Alan, Nichal, Alif, Syarif, Memet, Pacil, Teja, ikhlas, Adit, dan Thesar sebagai Keluarga Nagasobung yang selalu menjadi sahabat terbaik selama di kampus baik dikala senang atau susah.
8. Temen-temen Barajuang yang selalu memberika support dalam proses pengerjaan tugas akhir ini
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, dengan tanpa mengurangi rasa terimakasih penulis.

Dalam menyusun tugas akhir ini, penulis menyadari masih banyak kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, kritik, saran maupun diskusi sangat diharapkan penulis untuk kemajuan ilmu pengetahuan.

Surabaya, 5 Juni 2017

Penulis

# DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan .....	2
1.5 Metodologi .....	2
1.6 Sistematika Penulisan .....	3
1.7 Relevansi .....	4
BAB 2 DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH PADA SISTEM DENGAN WIND TURBINE DAN MEDIA PENYIMPANAN ENERGI .....	5
2.1 Sistem Tenaga Listrik .....	5
2.1.1 Sistem Pembangkitan .....	6
2.1.2 Transmisi Tenaga Listrik .....	10
2.1.3 Sistem Pembebanan .....	11
2.2 Economic Dispatch .....	12
2.3 Dynamic Economic Dispatch .....	13
2.4 Constraints .....	13
2.5 Quadratic Programming .....	15
BAB 3 PENERAPAN QUADRATIC PROGRAMMING UNTUK DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH PADA SISTEM DENGAN WIND TURBINE DAN MEDIA PENYIMPANAN ENERGI .....	19
3.1 Quadratic Programming Pada MATLAB .....	19
3.1.1 Input Argumen pada Matpower .....	19
3.1.2 Sintaksis Quadratic Programming (quadprog) .....	19
3.2 Penerapan Quadratic Programming pada Dynamic Economic Dispatch .....	20

3.2.1	Inisiasi Permasalahan Dynamic Economic Dispatch (DED).....	20
3.2.2	Pembentukan Matriks H Simetris dari Persamaan Kuadratik .....	21
3.2.3	Pembentukan Vektor C yang Menyatakan Bentuk Linier dari Cost Function.....	22
3.2.4	Pembentukan Matriks A yang Menyatakan Koefisien Linier dari Equality dan Inequality Constraint .....	22
3.2.5	Pembentukan Vektor lb dan ub yang Menyatakan Batas Atas dan Bawah dari Constraint .....	25
3.2.6	Pembentukan Vektor $x_{\max}$ dan $x_{\min}$ yang Menyatakan Batas Bawah dan Batas Atas .....	26
3.3	Penerapan Algoritma pada Dynamic Economic Dispatch Menggunakan Quadratic Programming.....	26
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA DATA .....		29
4.1	Hasil Simulasi .....	29
4.1.1	Sistem IEEE 30 bus.....	29
4.2	Studi Kasus .....	32
4.2.1	Studi Kasus 1 .....	33
4.2.2	Studi Kasus 2 .....	36
4.2.3	Studi Kasus 3 .....	41
4.3	Analisa Hasil Simulasi .....	51
4.3.1	Total Biaya Pembangkitan .....	51
4.3.2	Charging Discharging pada Baterai.....	52
BAB 5 PENUTUP.....		55
5.1	Kesimpulan .....	55
5.2	Saran .....	55
DAFTAR PUSTAKA.....		57
LAMPIRAN .....		59
BIODATA PENULIS .....		73

## DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 2. 1 SKEMA SISTEM TENAGA LISTRIK .....	5
GAMBAR 2. 2 KURVA DAYA WIND TURBINE SIEMENS SWT-2.3-82 .....	8
GAMBAR 2. 3 KURVA BEBAN HARIAN JAWA-BALI .....	11
GAMBAR 3. 1 SISTEM 3 BUS.....	23
GAMBAR 4. 1 SINGLE LINE DIAGRAM 30 BUS .....	29
GAMBAR 4. 2 KURVA BEBAN SELAMA 24 JAM.....	32
GAMBAR 4. 3 GRAFIK PEMBANGKITAN WEEKDAYS.....	34
GAMBAR 4. 4 GRAFIK PEMBANGKITAN WEEKEND.....	36
GAMBAR 4. 5 GAMBAR KECEPATAN ANGIN.....	38
GAMBAR 4. 6 GRAFIK PEMBANGKITAN WEEKDAYS.....	39
GAMBAR 4. 7 GRAFIK PEMBANGKITAN WEEKEND.....	41
GAMBAR 4. 8 GRAFIK PEMBANGKITAN WEEKDAYS.....	44
GAMBAR 4. 9 CHARGING DISCHARGING BATERAI 1 WEEKDAYS .....	44
GAMBAR 4. 10 CHARGING DISCHARGING BATERAI 2 WEEKDAYS .....	45
GAMBAR 4. 11 CHARGING DISCHARGING BATERAI 3 WEEKDAYS .....	45
GAMBAR 4. 12 CHARGING DISCHARGING BATERAI 4 WEEKDAYS .....	45
GAMBAR 4. 13 CHARGING DISCHARGING BATERAI 5 WEEKDAYS .....	46
GAMBAR 4. 14 GRAFIK PEMBANGKITAN WEEKEND.....	48
GAMBAR 4. 15 CHARGING DISCHARGING BATERAI 1 WEEKEND .....	49
GAMBAR 4. 16 CHARGING DISCHARGING BATERAI 2 WEEKEND .....	49
GAMBAR 4. 17 CHARGING DISCHARGING BATERAI 3 WEEKEND .....	49
GAMBAR 4. 18 CHARGING DISCHARGING BATERAI 4 WEEKEND .....	50
GAMBAR 4. 19 CHARGING DISCHARGING BATERAI 5 WEEKEND .....	50

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

TABEL 4. 1 PROFIL GENERATOR IEEE 30 BUS .....	30
TABEL 4. 2 DATA PEMBEBANAN .....	30
TABEL 4. 3 HASIL SIMULASI STUDI KASUS 1 WEEKDAYS .....	33
TABEL 4. 4 HASIL SIMULASI KASUS 1 WEEKEND .....	35
TABEL 4. 5 DATA MASUKAN KECEPATAN ANGIN .....	37
TABEL 4. 6 HASIL SIMULASI STUDI KASUS 2 WEEKDAYS .....	38
TABEL 4. 7 HASIL SIMULASI STUDI KASUS 2 WEEKEND .....	40
TABEL 4. 8 DATA MASUKAN BATERAI .....	42
TABEL 4. 9 HASIL SIMULASI STUDI KASUS 3 WEEKDAYS .....	42
TABEL 4. 10 CHARGING DISCHARGING BATERAI WEEKDAYS .....	46
TABEL 4. 11 HASIL SIMULASI STUDI KASUS 3 WEEKEND .....	47
TABEL 4. 12 CHARGING DISCHARGING BATERAI WEEKEND .....	50
TABEL 4. 13 COST FUNCTION HASIL SIMULASI .....	52
TABEL 4. 14 DATA CYCLE BATERAI .....	52

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Konsumsi energi listrik semakin meningkat setiap tahunnya menjadi kebutuhan primer yang harus dipenuhi saat ini. Dari sektor ketenagalistrikan, saat ini pembangkit listrik di Indonesia masih didominasi oleh bahan bakar fosil, khususnya batubara. Pengembangan energi baru terbarukan menjadi solusi untuk proyeksi masa depan. Pada saat ini sumber energi terbarukan yang banyak digunakan yaitu angin, matahari, dan air. *Wind turbine* adalah pembangkit listrik alternatif yang memanfaatkan energi angin, hal tersebut merupakan perkembangan yang dilakukan setelah tenaga air [1]. Berdasarkan perkembangan teknologi energi terbarukan, energi angin telah menjadi salah satu alternatif yang menjanjikan dan ekonomis. Energi angin dalam jumlah besar sedang diintegrasikan ke dalam jaringan listrik [2]. Perkembangan saat ini, terlihat besar peningkatan permintaan listrik, terdapat beberapa persyaratan baru untuk keamanan, stabilitas, dan operasi ekonomi dari sistem yang diusulkan. Masalah jaringan listrik pengiriman dan beban puncak lebih menjadi prioritas utama untuk diselesaikan. Oleh karena itu, permasalahan mengenai puncak kapasitas beban jaringan listrik dan pemanfaatan energi terbarukan merupakan tugas penting dari jaringan listrik [3]. Salah satu penyelesaian yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan *Dynamic Economic Dispatch (DED)*. Kegunaan *dynamic economic dispatch* adalah untuk menjamin keamanan, stabilitas, dan keandalan sistem sehingga dapat meningkatkan pembangkit listrik, efisiensi transmisi, dan mengurangi biaya listrik [4].

Penggunaan media penyimpanan energi telah diusulkan sebagai cara mengurangi variabilitas *wind turbine*. Kemajuan teknologi yang digunakan secara luas dari sistem energi ini, seperti media penyimpanan energi (baterai), diharapkan biaya pembangkitan dapat turun [1]. Adapun solusi yang memungkinkan adalah operator jaringan memastikan stabilitas jaringan distribusi listrik dan pasar listrik pada umumnya. Dalam kebutuhan listrik masa depan, *wind turbine* mungkin harus beroperasi dengan aturan yang sama seperti sumber pembangkit tenaga listrik konvensional lainnya, hal ini termasuk bentuk komitmen untuk memberikan daya konstan pada periode waktu tertentu. Pengembangan *wind turbine* ini sangat penting dan media penyimpanan energi dapat

mengoptimalkan pembangkitan dengan memiliki kemampuan mengatur konsumsi daya yang dibangkitkan.

## **1.2 Permasalahan**

Beberapa permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana strategi keluaran daya yang optimal pada sistem yang terhubung dengan *wind turbine* yang dan media penyimpanan energi.
2. Apa pengaruh *energy cycle limit* terhadap keluaran daya pada sistem yang terhubung dengan *wind turbine* dan media penyimpanan energi.
3. Bagaimana menentukan biaya yang paling optimal dari daya yang dibangkitkan pada sistem.

## **1.3 Batasan Masalah**

Terdapat batasan-batasan dari permasalahan diatas dalam melakukan penelitian ini, antara lain :

1. Rugi-rugi yang ada diabaikan.
2. Model spesifikasi *wind turbine* sama seperti yang digunakan pada *paper*.
3. Simulasi yang digunakan menggunakan Matpower.
4. Sistem dalam keadaan stabil.
5. Menggunakan plan IEEE 30 bus.
6. Biaya operasi dan *maintenance* diabaikan.

## **1.4 Tujuan**

Tujuan adanya penelitian ini adalah untuk :

1. Mengetahui strategi keluarnya daya yang ideal pada suatu pembangkitan yang ada pada sistem.
2. Mengetahui pengaruh *energy cycle limit* terhadap keluaran daya pada pembangkit thermal maupun *renewable* yang terhubung media penyimpanan energi.
3. Dapat menentukan biaya yang paling efektif dari daya yang dibangkitkan pada suatu pembangkit.

## **1.5 Metodologi**

Ada beberapa metode yang akan digunakan dalam membantu pengerjaan penelitian ini, yaitu :

1. Studi Literatur  
 Dalam penelitian ini, studi literatur yang digunakan adalah mengumpulkan referensi dari berbagai sumber seperti buku ataupun paper mengenai *wind turbine*, *economic dispatch*, *energy storage system*. Studi literatur ini berguna untuk membantu terlaksananya penelitian dalam bentuk analisa dan data yang ada khususnya secara teoritis.
2. Pengumpulan Data  
 Beberapa data yang didapatkan meliputi beberapa hal seperti grafik pembebanan, kondisi cuaca, biaya pembangkitan dengan adanya media penyimpanan energi ataupun tidak dan mempertimbangkan adanya pengaruh *energy cycle limit*.
3. Pemodelan  
 Penulis akan membuat program dalam Matpower dengan penerapan *quadratic programming* pada *dynamic economic dispatch*.
4. Simulasi dan Analisa Data  
 Data yang diperoleh nantinya akan disimulasikan menggunakan software MATLAB agar memperoleh hasil yang optimal dan akurat dari algoritma yang digunakan.
5. Penulisan Laporan  
 Penulisan hasil penelitian ini merupakan kesimpulan yang telah diperoleh dari metode yang dilakukan. Bentuk kesimpulan yang ada adalah hasil dari jawaban atas suatu permasalahan yang dianalisis.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Laporan penelitian ini disusun dalam suatu sistematika sebagai berikut :

1. Bab 1 : PENDAHULUAN  
 Bagian ini membahas mengenai dasar-dasar penelitian seperti latar belakang, rumusan permasalahan, tujuan penelitian, batasan-batasan masalah, metodologi pengerjaan penelitian, sistematika dan relevansi dari penyusunan laporan penelitian yang dilakukan.
2. Bab 2 : *DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH* PADA SISTEM DENGAN *WIND TURBINE* DAN MEDIA PENYIMPANAN ENERGI

Pada bagian ini, akan membahas landasan teori yang mendukung dari penelitian yang dilakukan terutama penjelasan mengenai *economic dispatch*, *wind turbine* dan media penyimpanan energi.

3. Bab 3 : PENERAPAN *QUADRATIC PROGRAMMING* UNTUK *DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH* PADA SISTEM DENGAN *WIND TURBINE* DAN MEDIA PENYIMPANAN ENERGI

Bagian ini menjelaskan tentang penerapan metode *quadratic programming* pada *economic dispatch* untuk *wind turbine* yang terhubung dengan media penyimpanan energi dengan mempertimbangkan *energy cycle limit*.

4. Bab 4 : SIMULASI DAN ANALISA DATA

Bagian ini membahas mengenai hasil simulasi dari optimasi daya yang dibangkitkan dengan biaya yang paling efisien dari *wind turbine* dengan penerapan metode *quadratic programming*.

5. Bab 5 : PENUTUP

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian dan saran-saran yang diberikan berhubungan dengan pokok permasalahan yang dibahas.

## 1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat antara lain :

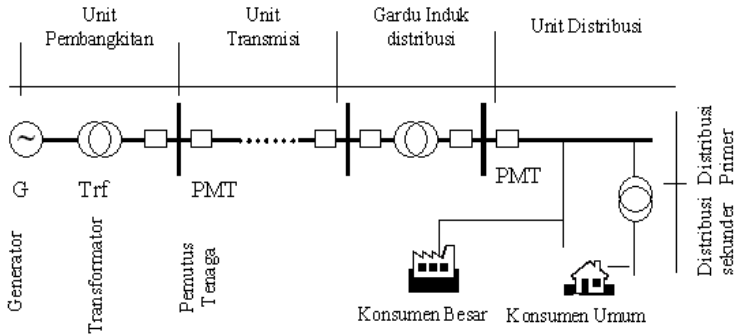
1. Memberikan suatu acuan terkait daya yang dibangkitkan dari *wind turbine* dengan mempertimbangkan total biaya yang digunakan.
2. Dapat memberikan referensi untuk mahasiswa lain dalam pengerjaan tugas akhir atas suatu permasalahan yang serupa di kemudian hari.
3. Dapat menambah ilmu pengetahuan dalam bidang operasi sistem tenaga listrik bagi penulis.

## BAB 2

### ***DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH PADA SISTEM DENGAN WIND TURBINE DAN MEDIA PENYIMPANAN ENERGI***

#### **2.1 Sistem Tenaga Listrik**

Sistem Tenaga Listrik adalah beberapa unsur perangkat peralatan yang terdiri dari pembangkitan, penyaluran, distribusi dan pelanggan satu dengan lainnya serta saling bekerja sama sehingga menghasilkan tenaga listrik. Tenaga listrik dikonsumsi oleh masyarakat perorangan maupun industri. Hal ini berarti bahwa tenaga listrik sangat penting bagi kelangsungan proses produksi, baik industri kecil, menengah maupun industri besar. Sistem Tenaga Listrik terdiri dari beberapa komponen berupa pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban yang saling berhubungan serta berkerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Konsumsi daya yang ada pada masyarakat inilah yang digunakan untuk keperluan sehari-hari. Secara garis besar gambar sistem tenaga listrik seperti pada gambar di bawah ini.



**Gambar 2. 1** Skema Sistem Tenaga Listrik

Pada sistem tenaga listrik perlu memperhatikan beberapa kriteria seperti, keamanan, ekonomi, dan kualitas daya listrik itu sendiri. Beberapa kriteria itu harus diperhatikan agar daya listrik yang dihasilkan dapat optimal sebelum disalurkan ke konsumen. Keamanan pada sistem tenaga listrik adalah bentuk preventif atau langkah pencegahan apabila

terjadi gangguan pada sistem. Sementara itu, ekonomi yang dimaksud adalah biaya operasi dari setiap pembangkit tenaga listrik pada sistem tersebut. Kualitas daya listrik terkait dengan kualitas daya yang dibangkitkan pada sistem kelistrikan, mengenai kualitas tegangan dan frekuensi yang memenuhi standar atau tidak dalam pemenuhan beban yang diminta.

### **2.1.1 Sistem Pembangkitan**

Pada sub bab ini menjelaskan sistem pembangkit yang terdiri dari generator dan *wind turbine*.

#### **2.1.1.1 Generator**

Generator merupakan komponen yang sangat menentukan suatu sistem pembangkit. Pembangkit yang berkapasitas besar biasanya menggunakan generator AC sinkron 3 fasa. Generator jenis ini mempunyai keuntungan yaitu pengaturan tegangan dan frekuensinya lebih sederhana. Namun pada umumnya, generator yang biasa digunakan pada sistem tenaga listrik yaitu generator tiga fasa atau generator sinkron. Kegunaan dari generator itu sendiri adalah mengubah energi mekanik menjadi energi listrik menggunakan prinsip induksi elektromagnet.

Pada penelitian ini digunakan 6 generator pada sistem dengan jumlah total 30 bus (berdasarkan IEEE) dengan *rating* daya yang berbeda-beda. *Rating* ini membatasi daya maksimum dan daya minimum yang dapat dibangkitkan oleh generator itu sendiri. Batasan daya ini membuat generator dapat beroperasi dengan optimal karena apabila generator beroperasi melebihi *rating*-nya, maka dapat membuat generator mengalami kerusakan.

#### **2.1.1.2 Wind turbine**

*Wind turbine* adalah suatu pembangkit listrik terbaru yang memanfaatkan energi angin dan dirubah menjadi energi listrik. Desain *wind turbine* terdiri dari dua hal penting yang harus diperhitungkan yaitu ketersediaan angin dan kurva daya dari *wind turbine* itu sendiri. Keluaran daya dari *wind turbine* merupakan fungsi dari kecepatan angin. Memodelkan performansi dari *wind turbine*, kurva daya harus diperoleh.

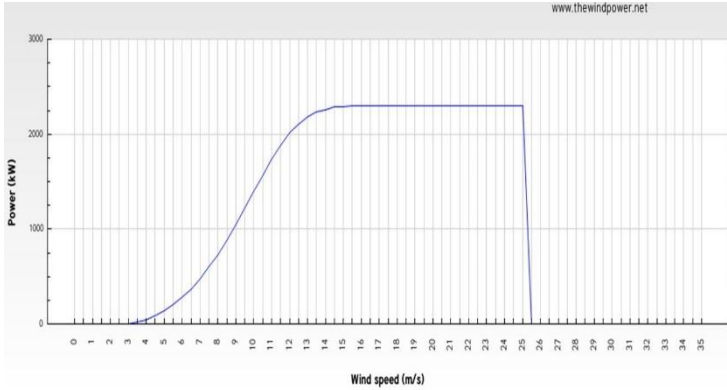
Keterbatasan ketersediaan akan energi angin (tidak sepanjang hari angin akan selalu tersedia) menyebabkan ketersediaan listrik pun tidak menentu. Oleh karena itu digunakan alat penyimpan energi yang berfungsi sebagai *back-up* energi listrik. Ketika beban penggunaan daya

listrik masyarakat meningkat dan/atau kecepatan angin suatu daerah sedang menurun, maka kebutuhan permintaan akan daya listrik tidak dapat terpenuhi. Oleh karena itu, kita perlu menyimpan sebagian energi yang dihasilkan ketika terjadi kelebihan daya pada saat *wind turbine* berputar kencang atau saat penggunaan daya oleh masyarakat menurun. Penyimpanan energi ini diakomodasi oleh media penyimpan energi yaitu baterai.

Jenis *wind turbine* dibagi menjadi 2 (dua), yaitu *wind turbine* sumbu horizontal dan *wind turbine* sumbu tegak. *Wind turbine* sumbu horizontal memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin (baling-baling cuaca) yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah servo motor. Sebagian besar memiliki sebuah *gearbox* yang mengubah perputaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar. Sebuah menara menghasilkan turbulensi di belakangnya maka turbin biasanya diarahkan melawan arah anginnya menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar mereka tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan, bilah-bilah itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan.

Karena turbulensi menyebabkan kerusakan struktur menara, dan realibilitas begitu penting, sebagian besar *wind turbine* sumbu horizontal merupakan mesin *upwind* (melawan arah angin). Meski memiliki permasalahan turbulensi, mesin *downwind* dibuat karena tidak memerlukan mekanisme tambahan agar mereka tetap sejalan dengan angin, dan karena saat angin berhembus sangat kencang, bilah-bilahnya bisa ditekuk sehingga mengurangi wilayah tiupan mereka dan dengan demikian juga mengurangi resintensi angin dari bilah-bilah itu, dan *wind turbine* sumbu horizontal ini adalah tipe yang sering digunakan saat ini.

Pada penelitian ini kapasitas *wind turbine* yang digunakan dalam skala besar (MWh), maka digunakan *wind turbine* tipe Siemens SWT-2.3-82 - *Manufacturers and turbines* dengan rating 2.3 MW sebanyak 4 buah *wind turbine*. Berikut adalah grafik kurva daya dari *wind turbine*



**Gambar 2. 1** Kurva Daya *Wind Turbine* Siemens SWT-2.3-82

Dari model kurva daya tersebut dapat diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$P_{WT} = 0 \quad V_{ac} < V_{ci} \quad (2.1)$$

$$P_{WT} = aV_{ac}^3 + bV_{ac}^2 + cV_{ac} + d \quad V_{ci} \leq V_{ac} \leq V_r \quad (2.2)$$

$$P_{WT,r} = V_r \quad V_r \leq V_{ac} \text{ dan } V_{co} > V_{ac} \quad (2.3)$$

Dimana :

$P_{WT}$  : daya keluaran dari *wind turbine* dalam MW

$P_{co}$  : daya saat *cut-out* dalam MW

$V_r$  : *rating* kecepatan angin dalam m/s

$V_{ac}$  : kecepatan angin aktual dalam m/s

$V_{ci}$  : kecepatan *cut-in* dalam m/s

$V_{co}$  : kecepatan *cut-out* dalam m/s

Berdasarkan kurva *wind turbine* diatas, maka kita diperoleh data terkait performansi dari *wind turbine* itu sendiri. Persamaan matematis yang dapat diperoleh berdasarkan kurva diatas adalah dengan parameter sebagai berikut:

$$a = -2.8851$$

$$b = 82.316$$

$$c = -485.35$$

$$d = 814.43$$

$$P_{co} = 0$$

$$V_{ci} = 3.5$$



$$V_{co} = 25$$

$$V_r = 17$$

### 2.1.1.3 Media Penyimpanan Energi

Pada sistem kelistrikan ini yang disambungkan dengan media penyimpanan energi (baterai), baterai mampu menjadi pensuplai daya maupun beban, tergantung dari besar pembangkitan pembangkit thermal dan *renewable* yaitu *wind turbine*. Baterai memiliki kemampuan untuk menyimpan kelebihan daya dari pembangkitan *renewable* dan memberikan pasokan daya ketika sistem mengalami kekurangan daya.

Pada penelitian ini, daya baterai digunakan apabila pembangkit thermal dan pembangkit *renewable* tidak mampu untuk men-*supply* beban atau memenuhi beban yang diminta. Dengan adanya hal tersebut, maka terdapat kemungkinan bahwa perlunya penghematan daya untuk setiap waktunya dalam memenuhi beban yang diminta. Oleh karena itu, perlunya pengaturan pemakaian baterai apabila terjadi kondisi bahwa pembangkit utama tidak mampu memenuhi permintaan beban.

Strategi yang dilakukan untuk melakukan penghematan adalah mengatur penggunaan baterai, hal tersebut juga akan berimbas pada kerja sistem kelistrikan secara keseluruhan. Pada setiap waktu *state of charge* (SOC) dari baterai harus memenuhi persyaratan yang ditunjukkan oleh persamaan berikut [4]:

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (2.4)$$

$$-P_{cha\_max} \leq P_{batt} \leq P_{discha\_max} \quad (2.5)$$

Besarnya nilai *charging* atau *discharging* pada saat (t) tertentu diperoleh dengan perhitungan matematis sebagai berikut [5] :

$$E_{min} \leq E(t) - \sum_{s=0}^k P_{batt} \Delta t \leq E_{max} \quad (2.6)$$

Dimana :

$E_{min}$  = energi minimum pada baterai (MWh)

$E_{max}$  = energi maksimum pada baterai (MWh)

Pada penelitian ini, baterai yang digunakan berdasarkan pada paper sebanyak 5 buah dengan kapasitas masing-masing baterai sama dan

ditempatkan pada bus yang berbeda-beda. Menggunakan baterai jenis *Li-ion battery* dengan kapasitas 300 Ah dan 12.8 Volt.

Ketika kondisi beban pada sistem lebih kecil dari total pembangkitan *renewable* maka daya yang masuk ke dalam baterai dimodelkan sebagai berikut:

$$U_{batt} = P_{renew} - Load \quad (2.7)$$

$$P_{renew} = P_{WT} \quad (2.8)$$

$$C_{batt(t)} = C_{batt(t-1)} + U_{batt} \quad (2.9)$$

Dimana:

$U_{batt}$  : kelebihan daya yang disimpan *baterai* dalam MW

$P_{renew}$  : total daya *renewable energy* dalam MW

$Load$  : total beban dalam MW

$P_{WT}$  : total daya *wind turbine* dalam MW

$C_{batt(t)}$  : kapasitas *baterai* pada saat t dalam MWh

Sedangkan ketika kondisi beban pada sistem lebih besar dari total pembangkitan *renewable* maka daya baterai yang digunakan untuk sistem dimodelkan sebagai berikut:

$$V_{batt} = Load - P_{renew} \quad (2.10)$$

$$P_{renew} = P_{WT} \quad (2.11)$$

$$P_{capbatt(t)} = P_{capbatt(t-1)} - V_{batt} \quad (2.12)$$

Dimana:

$V_{batt}$  : kekurangan daya yang disuplai oleh baterai dalam MW

$P_{renew}$  : total daya *renewable energy* dalam MW

$Load$  : total beban dalam MW

$P_{WT}$  : total daya *wind turbine* dalam MW

$C_{batt(t)}$  : kapasitas *baterai* pada saat t dalam MWh

### 2.1.2 Transmisi Tenaga Listrik

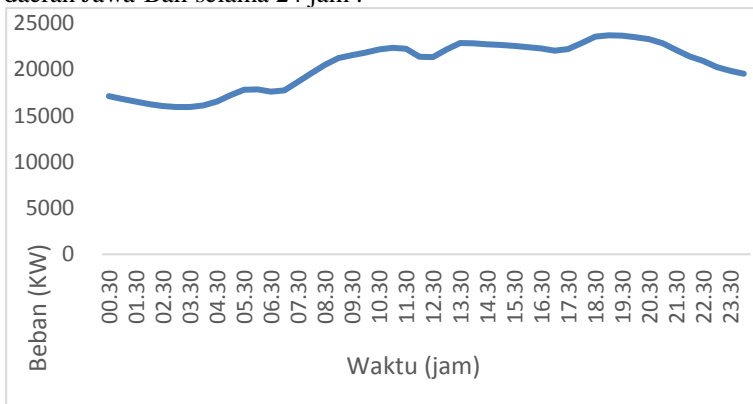
Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkit tenaga listrik (*Power Plant*) hingga saluran distribusi listrik (*substation distribution*) sehingga dapat disalurkan sampai pada konsumen pengguna listrik. Tegangan yang berasal dari generator akan dinaikkan terlebih dahulu dengan menggunakan trafo *step-up* sebelum masuk pada saluran transmisi. Kemudian tegangan akan diturunkan lagi menggunakan trafo *step-down* masuk ke saluran distribusi

yang nantinya akan menyuplai daya listrik ke konsumen atau masyarakat. Kegunaan trafo ini untuk mengurangi *losses* yang didapatkan dari proses penyaluran daya. Selain itu, untuk mengurangi daya reaktif, pada saluran transmisi juga dapat dipasang kapasitor bank yang berguna untuk memperbaiki tegangan dan faktor daya karena apabila tidak diperbaiki akan menyebabkan sistem tidak beroperasi secara optimal.

### 2.1.3 Sistem Pembebanan

Beban pada sistem tenaga dibagi menjadi beberapa kawasan yaitu kawasan industri, komersial, dan residensial. Permintaan beban yang dibutuhkan oleh para konsumen selalu berubah-ubah pada tiap harinya atau pada tiap satuan waktu. Karakteristik beban pada sistem tenaga listrik terhadap fungsi waktu 24 jam juga mengalami perbedaan di tiap jamnya.

Dalam keseharian, pembebanan mengalami kondisi permintaan beban maksimal pada saat malam hari dimana konsumsi daya listrik mengalami puncaknya. Hal tersebut cenderung lebih tinggi dibandingkan permintaan daya pada saat pagi, siang atau sore hari. Permintaan yang tinggi tersebut mengharuskan pembangkit tenaga listrik bekerja secara maksimal untuk dapat menyuplai daya listrik di saat itu. Masing-masing beban dipenuhi oleh pembangkit yang mempunyai karakteristik yang berbeda-beda, dan hal itu sesuai untuk memenuhi keluaran beban yang diminta. Besar keluaran beban yang besar juga berbanding lurus dengan biaya operasi yang tinggi ditinjau dari biaya bahan bakar dari masing-masing pembangkitan. Berikut adalah contoh kurva beban harian pada daerah Jawa-Bali selama 24 jam :



**Gambar 2. 2** Kurva Beban Harian Jawa-Bali

Dari gambar tersebut memang diperoleh hasil rata-rata permintaan beban sehari-hari di daerah Jawa-Bali. Permintaan beban yang tidak selalu konstan dan berubah-ubah sesuai dengan pembagian waktu dalam sehari, dijelaskan dalam 24 jam. Masing-masing beban dipenuhi oleh tiap pembangkit yang sesuai dengan karakteristik dari pembebanan tersebut. Namun, pada penelitian ini lebih dioptimalkan dari tiap unit pembangkit atau generator untuk dapat beroperasi secara maksimal. Beban puncak akan dipenuhi oleh unit pembangkit yang memiliki *cost function* lebih murah daripada unit pembangkit lainnya.

## 2.2 *Economic Dispatch*

*Economic Dispatch* atau pembebanan ekonomis adalah pengoptimalan dari suatu beban pada setiap unit pembangkit secara ekonomis terhadap suatu permintaan beban yang ada pada sistem. Pada penerapannya akan didapatkan biaya pembangkitan yang minimim terhadap produksi daya listrik yang dibangkitkan setiap unit pembangkit pada suatu sistem kelistrikan yang memenuhi batasan persamaan (*equality constraint*) dan batasan pertidaksamaan (*inequality constraint*). Batasan persamaan mencerminkan suatu keseimbangan daya nyata dan batasan pertidaksamaan mencerminkan batas minimum dan batas maksimum pembangkitan yang harus dipenuhi sehingga diperoleh total biaya bahan bakar yang minimum. Tiap pembangkit memiliki karakteristik yang berbeda-beda sehingga berpengaruh pada fungsi kebutuhan dan biaya bahan bakarnya. Perbedaan karakteristik itu dipengaruhi oleh jenis bahan bakar dan efisiensi dari pembangkit. Sehingga bisa diperoleh hasil akhirnya adalah pengoptimalan daya yang dibangkitkan pada setiap unit generator dengan mempertimbangkan fungsi biaya setiap unitnya terhadap fungsi waktu (24 jam).

*Economic Dispatch* sendiri memiliki tujuan utama yaitu meminimalkan konsumsi bahan bakar dari setiap pembangkit pada sistem yang ada dengan menentukan porsi pembebanan dari setiap unit pembangkit. Pada penelitian ini, bahan bakar adalah faktor yang memiliki pengaruh terhadap fungsi biaya dalam menentukan porsi pembebanan dari setiap unit pembangkit pada sistem tenaga listrik.

Persamaan *cost function* atau fungsi biaya dari setiap unit pembangkit h-unit dimodelkan sebagai berikut [6] :

$$CF = a_h P_h^2 + b_h P_h + c_h \quad (2.13)$$

Dimana :

$CF$  : total biaya operasi generator (\$/h)  
 $a$  ,  $b$  , dan  $c$  : koefisien biaya generator  
 $P_h$  : daya yang dibangkitkan pembangkit  $h$  (MW)

### 2.3 Dynamic Economic Dispatch

*Dynamic Economic Dispatch* adalah pengembangan dari *Economic Dispatch*. Hanya saja, pada *dynamic economic dispatch* sendiri lebih memperhitungkan terhadap fungsi waktu selama 24 jam. Besar beban yang ada pada sistem tenaga listrik sendiri selalu berubah-ubah pada tiap periodenya, maka dari itu untuk memenuhi beban yang diminta, perlunya pengoptimalan dari setiap unit pembangkit yang ada (*h-unit*) terhadap periode waktu ( $t$ ).

Pada penelitian kali ini dengan menggunakan IEEE 30 bus setiap unit pembangkit sudah memiliki nilai koefisien dari biaya bahan bakar yang ada. Tujuan dari penelitian ini adalah dapat mengetahui biaya paling ekonomis dari suatu pembangkitan yang diminta oleh beban pada sistem tenaga listrik terhadap periode waktu atau bisa dibilang mencari nilai yang paling minimum dari suatu pembangkitan tenaga listrik.

*Cost function* dari setiap unit generator (*h-unit*) terhadap periode waktu dimodelkan sebagai berikut :

$$CF_{ht} = a_{ht}P_{ht}^2 + b_{ht}P_{ht} + c_{ht} \quad (2.14)$$

Dimana :

$CF_{ht}$  : total biaya operasi generator (\$/h)  
 $a$  ,  $b$  , dan  $c$  : koefisien biaya generator  
 $P_{ht}$  : daya yang dibangkitkan pembangkit  $h$  pada periode waktu  $t$  (MW)

### 2.4 Constraints

Daya yang dibangkitkan oleh pembangkit mempunyai hubungan yang tidak linear terhadap biaya pembangkitan. Keluaran daya yang dibangkitkan oleh setiap unit generator (*h-unit*) pada periode waktu ( $t$ ) pada sistem tenaga listrik harus memenuhi syarat dari kebutuhan daya yang ada pada sistem tenaga listrik atau bisa kita sebut dengan istilah **equality constraint** dan harus memenuhi daya dari batas minimum dan maksimum dari daya yang dapat dibangkitkan oleh suatu generator (*h-*

*unit*) atau bisa kita sebut dengan istilah ***inequality constraint***. Batasan-batasan tersebut yang akan menjadi syarat dalam pemenuhan daya dalam suatu sistem tenaga listrik agar sistem dapat beroperasi secara optimal dan mampu membuat tiap unit generator bertahan lama dalam operasinya.

Penelitian ini menggunakan IEEE 30 bus untuk sistem pembangkitannya dengan total 6 generator (pembangkit thermal) dan 3 *renewable energy* (*wind turbine*) dan ditambahkan oleh 5 unit baterai di dalam sistemnya. Pembangkit thermal mempunyai biaya bahan bakar (*cost function*) dan karakteristik yang berbeda pada tiap pembangkitnya. Namun untuk *wind turbine* dan baterai, tidak ada biaya bahan bakar atau biaya operasinya karena *wind turbine* dan baterai bertujuan untuk mengurangi total biaya pembangkitan dari pemodelan sistem yang ada.

Adapun persamaan atau fungsi dari total biaya dari operasi pembangkit yang ada pada sistem adalah sebagai berikut :

$$CF(P) = CF(P_{thermal}) + CF(P_{WT}) + CF(P_{batt}) \quad (2.15)$$

$$CF(P_{WT}) + CF(P_{batt}) = 0 \quad (2.16)$$

Dimana :

$CF(P)$  : total biaya operasi pembangkit yang memiliki biaya pembangkitan dalam \$/h

$CF(P_{WT})$ : total biaya operasi *wind turbine* dalam \$/h

$CF(P_{batt})$ : total biaya operasi *baterai* dalam \$/h

### 2.4.1 Equality Constraint

*Equality constraint* merupakan batasan yang ada pada sistem tentang keseimbangan daya. Pada penelitian ini terdapat dua tipe jenis pembangkit yaitu thermal dan *renewable*. Oleh sebab itu, terdapat istilah yaitu beban bersih (*netto*) yang merupakan hasil dari pengurangan daya antara total beban sistem dengan pembangkit *renewable*. Beban netto ini yang nantinya akan dioptimalkan oleh pembangkit yang mempunyai biaya operasionalnya.

$$P_{net} = Load - P_{WT} \quad (2.17)$$

Dimana :

$P_{net}$  : beban netto dari sistem (MW)

$P_{WT}$  : daya yang dihasilkan oleh oembangkit renewable (MW)

### 2.4.2 *Inequality Constraint*

*Inequality constraint* merupakan batasan yang ada pada sistem tentang kapasitas daya dari suatu pembangkit. Terdapat dua tipe pembangkit utama yang ada pada penelitian ini, yaitu *thermal* dan *renewable* yang masing-masing pembangkit ini mempunyai batas minimum dan maksimum dari daya yang dibangkitkan selain dari kapasitas daya yang juga berbeda dan juga ada penambahan baterai yang ada di dalam sistem ini. Oleh karena itu, fungsi pertidaksamaannya adalah sebagai berikut :

$$P_{thermal\min} \leq P_{thermal} \leq P_{thermal\max} \quad (2.18)$$

$$P_{WT\min} \leq P_{WT} \leq P_{WT\max} \quad (2.19)$$

$$P_{charge\min} \leq P_{batt} \leq P_{charge\max} \quad (2.20)$$

Dimana :

- $P_{thermal\min}$  : daya operasi minimum dari pembangkit *thermal*
- $P_{thermal\max}$  : daya operasi maksimum dari pembangkit *thermal*
- $P_{WT\min}$  : daya operasi minimum dari *wind turbine*
- $P_{WT\max}$  : daya operasi maksimum dari *wind turbine*
- $P_{charge\min}$  : daya operasi minimum dari *battery*
- $P_{charge\max}$  : daya operasi maksimum dari *battery*

## 2.5 *Quadratic Programming*

*Quadratic programming* merupakan salah satu metode yang paling handal diatas model *linier programming* dalam menganalisa suatu permasalahan yang meliputi industri, *engineering* maupun bisnis. Metode *quadratic programming* ini mampu menyelesaikan permasalahan *non-linier* dan dapat memodelkan ke dalam sebuah fungsi objektif. Metode ini adalah salah satu metode optimasi yang sangat rekomendasi digunakan dalam mengoptimalkan suatu masalah fungsi kuadrat dari beberapa variabel yang ada dan pada batasan linier variabel-variabel yang ditentukan.

Permasalahan optimisasi linier yang dibatasi dengan fungsi tujuan kuadrat disebut *quadratic programming* dan dapat diaplikasikan pada berbagai bidang, *quadratic programming* sering dipandang sebagai suatu disiplin ilmu tersendiri. Selain digunakan untuk penerapan disiplin ilmu, *quadratic programming* juga mampu membentuk dasar dari beberapa algoritma non linear lainnya.

Persamaan umum dari *quadratic programming* dapat dimodelkan sebagai berikut :

Fungsi objektif :

$$F(x) = f + c^T x + \frac{1}{2} x^T H x \quad (2.21)$$

Dimana :

$f$  = konstanta skalar

$c$  = konstanta matriks  $n$ -vektor

$H$  = matriks  $n \times n$

$A$  = matriks  $m \times n$

$ub, lb$  = konstanta  $m$ -vektor

$x$  =  $n$ -vektor yang tidak diketahui

***Equality constraint***

$$lb = ub = b_{eq} \quad (2.22)$$

$$b_{eq} \leq Ax \leq b_{eq} \quad (2.23)$$

$$Ax = b_{eq} \quad (2.24)$$

***Inequality constraint***

$$lb \leq ub \quad (2.25)$$

$$lb \leq Ax \leq ub \quad (2.26)$$

$$xmin \leq x \leq xmax \quad (2.27)$$

## 2.6 Energy Cycle Limit

Pada penelitian ini yang dimaksud dengan *energy cycle limit* adalah batas energi yang digunakan pada baterai dalam proses *charging* *discharging* untuk dapat mengetahui perputaran energi yang ada pada baterai atau batas energi yang dilalui pada baterai dalam seumur hidup ( $Q_{lifetime}$  [1]. Seperti persamaan yang ada di bawah ini :

ESS, energy cycle limit :

$$\sum E_{batt} \leq Q_{lifetime} \quad (2.28)$$

Dimana :

$E_{batt}$  = energi pada baterai pada periode waktu ( $h$ ) (MWh)

$Q_{lifetime}$  = energi yang dilalui pada baterai dalam seumur hidup (MWh)



Total energi yang ada pada baterai saat proses *charging* *discharging* akan dikonversikan dalam bentuk *cycle* baterai, yang nantinya *cycle* baterai ini akan digunakan untuk menghitung *lifetime* dari baterai tersebut. Batas minimum dan maksimum dari SOC pada baterai juga menjadi faktor utama yang mempengaruhi lama *lifetime* baterai selain dilihat dari kapasitas dari baterai tersebut. Berikut adalah persamaan dalam menentukan cycle dari baterai :

$$cycle_{(day)} = \frac{\sum_{i=0}^n P_{ch} P_{dis}}{C_{batt}} \quad (2.29)$$

Dimana :

$C_{batt}$  = kapasitas baterai (MWh)

$P_{ch}$  = daya yang masuk pada baterai pada periode waktu  $h$  (MW)

$P_{dis}$  = daya yang keluar pada baterai pada periode waktu  $h$  (MW)

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 3

### PENERAPAN QUADRATIC PROGRAMMING UNTUK DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH PADA SISTEM DENGAN *WIND TURBINE* DAN MEDIA PENYIMPANAN ENERGI

#### 3.1 Quadratic Programming Pada MATLAB

*Quadratic programming* merupakan salah satu fungsi pada MATLAB untuk menyelesaikan fungsi kuadrat. Dalam penelitian ini untuk melakukan penyelesaian pada *dynamic economic dispatch* yaitu dengan menggunakan Matpower.

##### 3.1.1 Input Argumen pada Matpower

Terdapat fungsi `qps_matpower` yang ada pada Matpower untuk pengembangan dari quadratic programming itu sendiri. Input argumen tersebut adalah sebagai berikut :

- $H$  = Matriks simetris yang menyatakan bentuk kuadratik dari persamaan  $1/2 * x' * H * x + c'x$
- $c$  = Merupakan vektor yang menyatakan bentuk linier dari persamaan  $1/2 * x' * H * x + c'x$
- $A$  = Matriks yang menyatakan koefisien linier dari equality dan inequality constraint  $A * x \leq b$
- $lb$  = Vektor yang menyatakan batas bawah dari permasalahan  $lb \leq x \leq ub$
- $ub$  = Vektor yang menyatakan batas atas dari permasalahan  $lb \leq x \leq ub$
- $x_o$  = Optional. Vektor yang menyatakan *initial point* dari algoritma *quadprog*

##### 3.1.2 Sintaksis Quadratic Programming (quadprog)

Perintah yang dapat digunakan untuk memanggil program dengan input argument dalam `qps_matpower` adalah sebagai berikut:

- $x = \text{qps\_matpower}(H, c, A, l, u)$   
Meminimalkan vektor  $x$  terhadap *inequality* dan *equality constraint*  $l \leq A*x \leq u$ ,  $H$  dan  $c$  merupakan fungsi objektif *quadratic programming*.
- $x = \text{qps\_matpower}(H, c, A, l, u, \text{xmin}, \text{xmax})$   
Meminimalkan vektor  $x$  terhadap *inequality* dan *equality constraint*  $l \leq A*x \leq u$  dan terdapat batasan nilai  $x$  maksimal dan  $x$  minimal.  $H$  dan  $c$  merupakan fungsi objektif *quadratic programming*.
- $x = \text{qps\_matpower}(H, c, A, l, u, \text{xmin}, \text{xmax}, x_0)$   
Menyelesaikan permasalahan *quadratic programming* dengan inisialisasi nilai awal  $x_0$  untuk mempercepat proses pencarian.

### 3.2 Penerapan *Quadratic Programming* pada Dynamic Economic Dispatch

Pada penelitian ini, *quadratic programming* yang digunakan menggunakan Matpower yang ada pada MATLAB.

#### 3.2.1 Inisiasi Permasalahan Dynamic Economic Dispatch (DED)

Nilai *objective function* sebagai fungsi kuadrat yang berasal dari koefisien biaya tiap pembangkit akan diproses oleh *quadratic programming* dengan persamaan sebagai berikut :

$$\text{Minimize } OF = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{h=1}^n (a_{ht} P_{ht}^2 + b_{ht} P_{ht} + c_{ht}) \right) \$/h \quad (3.1)$$

Dimana :

$a$  ,  $b$  , dan  $c$  : koefisien biaya generator  
 $P_{ht}$  : daya yang dibangkitkan pembangkit  $h$  pada periode waktu  $t$  (MW)

- ***Equality Constraint***

*Active Power Balance*

$$P_{Li}^t - P_{Gi}^t + P_{INi}^t = 0 \quad (3.2)$$

$$P_{IN}^t = \sum \frac{1}{x_{ij}} [\delta_i - \delta_j] \quad (3.3)$$

Keterangan :

$P_{IN}$  : Daya yang mengalir pada saluran dari bus  $i$  ke bus  $j$ ,

$P_{Li}$  : Daya pada load bus  $i$

$P_{Gi}$  : Daya pembangkitan generator pada bus  $i$

$\delta$  : Sudut tegangan

$x$  : Reaktansi saluran

- **Inequality Constraint**

*Ramp Rate*

$$-\delta_i \leq P_{Gi}^{t+1} - P_{Gi}^t \leq \delta_i \quad (3.4)$$

*Daya Pembangkitan*

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad (3.5)$$

*Charging Discharging*

$$E_{\min} \leq E(t) + \sum_{s=0}^k P_{batt} \Delta t \leq E_{\max} \quad (3.6)$$

### 3.2.2 Pembentukan Matriks $H$ Simetris dari Persamaan Kuadrat

Memodelkan *dynamic economic dispatch* ke dalam *quadratic programming*, variabel fungsi objektif diberikan output pembangkitan seperti pada persamaan berikut :

$$x = [P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{GN}]^T \quad (3.7)$$

Matriks dimanipulasi kembali menjadi matriks diagonal dengan masing-masing elemen matriks dikali dua sebagai penurunan dari bentuk kuadrat dari persamaan *cost function* pembangkit, matriks  $H$  sebesar  $n \times n$  yang menyatakan bentuk kuadrat dari persamaan  $\frac{1}{2}x' * H * x + c'x$  sebagai berikut :

$$H = 2 \times \begin{bmatrix} \frac{a_1}{1-2P_{G1}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{a_n}{1-2P_{Gn}} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Dengan:

$H$  = Matriks simetris yang menyatakan bentuk kuadratik dari persamaan  $\frac{1}{2}x^T H x + c^T x$

$a_i$  = Nilai *cost function* pada koefisien  $a$  pada baris ke-1

$a_n$  = Nilai *cost function* pada koefisien  $a$  pada baris ke- $n$

$P_{G1}$  = Daya yang dibangkitkan generator unit ke-1

$P_{Gn}$  = Daya yang dibangkitkan generator unit ke- $n$

### 3.2.3 Pembentukan Vektor $C$ yang Menyatakan Bentuk Linier dari *Cost Function*

Penentuan nilai koefisien  $b$  dari semua generator pembangkit untuk *cost function* dengan nilai  $n$  = jumlah generator pembangkit, kemudian dibentuklah matriks  $[1 : m \times n]$  dengan  $m$  adalah banyaknya jumlah beban yang ada dalam penelitian ini. Bentuk dari matriks yang ada adalah sebagai berikut :

$$c^T = \left[ \frac{b_1}{1-2P_{G1}}, \dots, \frac{b_n}{1-2P_{Gn}} \right] \quad (3.9)$$

$$c^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad b_1^1 \quad b_2^1 \quad -1] \quad (3.10)$$

Dengan:

$b_i$  = Nilai *cost function* pada koefisien  $b$  pada baris ke-1

$b_n$  = Nilai *cost function* pada koefisien  $b$  pada baris ke- $n$

$P_{G1}$  = Daya yang dibangkitkan generator unit ke-1

$P_{Gn}$  = Daya yang dibangkitkan generator unit ke- $n$

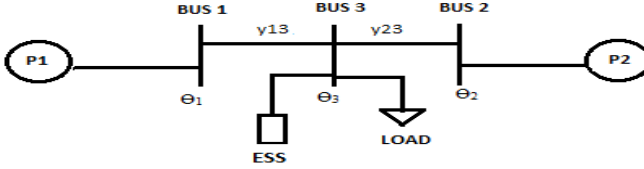
Untuk matriks  $c$  dengan periode lebih dari satu jam, maka matriks  $C$  saat  $t+1$  akan disusun secara vertikal dibawah matriks  $C$  saat periode  $t$ . Nilai -1 akan merepresentasikan koefisien untuk biaya pelepasan beban.

### 3.2.4 Pembentukan Matriks $A$ yang Menyatakan Koefisien Linier dari *Equality* dan *Inequality Constraint*

Pada penelitian ini, matriks  $A$  terdiri dari *equality constraint* ( $A_{eq}$ ) dan *inequality constraint* ( $A_{ieq}$ ). Dalam penyusunan matriks, *constraint* yang tidak berubah terhadap waktu seperti *active power balance* akan disusun terlebih dahulu untuk memudahkannya. *Ramp rate* dan *charging discharging* baterai akan disusun setelahnya.

$$A = \begin{bmatrix} A_{eq} \\ A_{ineq} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Sebagai contoh dapat digunakan sistem dengan 3 bus seperti gambar di bawah ini :



**Gambar 3. 1** Sistem 3 bus

*Equality constraint* dari permasalahan dynamic economic dispatch dapat dituliskan sebagai persamaan berikut :

- $A_{eq}$

Persamaan *active power balance* sebagai  $A_{eq}$  dapat dituliskan:

$$\begin{aligned} 0 - P_{G1}^1 + (y_{11}\theta_1 - y_{13}\theta_3)^1 &= 0 \\ 0 - P_{G2}^1 + (y_{22}\theta_2 - y_{23}\theta_3)^1 &= 0 \\ P_{L3}^1 - 0 + (-y_{13}\theta_1 - y_{23}\theta_2 + y_{33}\theta_3)^1 &= 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Matriks  $A_{eq}$  dapat dituliskan sebagai berikut:

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} y_{11} & 0 & -y_{13} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & y_{22} & -y_{23} & 0 & -1 & 0 \\ -y_{13} & -y_{23} & y_{33} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

- $A_{ieq}$

*Inequality constraint* merupakan batasan yang dapat dijabarkan dalam model matriks berikut ini :

*Ramp Rate*

$$-\delta_1 \leq P_{G1}^2 - P_{G1}^1 \leq \delta_1 \quad (3.14)$$

$$-\delta_2 \leq P_{G2}^2 - P_{G2}^1 \leq \delta_2 \quad (3.15)$$

Persamaan 3.14 dan 3.15 dapat dimasukkan pada matriks  $ng$  baris pada periode waktu  $t$  dan  $t+1$

*Charging Discharging*

$$E_{min} \leq E_{(t)} + \sum_{s=0}^k P_{batt} \Delta t \leq E_{max} \quad (3.16)$$

$$E_{min} - E_0 \leq + \sum_{s=0}^k P_{batt} \Delta t \leq E_{max} - E_0 \quad (3.17)$$

$$P_{batt} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{Jam\ ke-1}$ 
 $\underbrace{\hspace{10em}}_{Jam\ ke-2}$

Jadi pembentukan matriks A selama 2 jam adalah :

$A_{eq}^1$					0	0	0	0	0
					0	0	0	0	0
					0	0	0	0	0
$A_{ineq\ branch}^1$					0	0	0	0	0
					0	0	0	0	0
					0	0	0	0	0
					0	0	0	0	0
					0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	$A_{eq}^2$				
0	0	0	0	0					
0	0	0	0	0					
0	0	0	0	0					
0	0	0	0	0					
$A_{ineq\ branch}^2$					0	0	0	0	0
					0	0	0	0	0
					0	0	0	0	0
					0	0	0	0	0
					0	0	0	0	0
$Ramp\ Rate$									
$P_{batt}$									



### 3.2.5 Pembentukan Vektor $lb$ dan $ub$ yang Menyatakan Batas Atas dan Bawah dari *Constraint*

Vektor  $lb$  dan  $ub$  merupakan batas bawah dan atas dari constraint yang ada pada sistem. Pembentukan vektor  $lb$  dan  $ub$  yang ada pada Matpower merepresentasikan batasan seperti power balance, kapasitas saluran, ramp rate, charging discharging terhadap periode waktu.

$$lb = \begin{bmatrix} 0^1 \\ 0^1 \\ 0^1 \\ -inf^1 \\ -inf^1 \\ -inf^1 \\ -inf^1 \\ 0^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} \begin{array}{l} b_{eq} \text{ power balance jam 1} \\ b_{ineq} \text{ kapasitas saluran jam 1} \\ b_{eq}, b_{ineq} \text{ power balance dan} \\ \text{kapasitas saluran jam 2} \end{array} \quad (3.19)$$

$$lb = \begin{bmatrix} -inf^2 \\ -\delta_1^{12} \\ -\delta_2^{12} \\ Emin - Eo \leq + \sum_{s=0}^k P_{batt} \Delta t \leq Emax - Eo \\ (Emin - Eo \leq + \sum_{s=0}^k P_{batt} \Delta t \leq Emax - Eo) \end{bmatrix} \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{charging discharging} \\ \text{baterai jam ke 1-2} \end{array}$$

$$ub = \begin{bmatrix} 0^1 \\ 0^1 \\ 0^1 \\ P_{13}^1 \text{ max} \\ P_{23}^1 \text{ max} \\ P_{31}^1 \text{ max} \\ P_{32}^1 \text{ max} \\ 0^2 \\ \vdots \\ P_{32}^2 \text{ max} \\ \delta_1^{12} \\ \delta_2^{12} \\ 0^1 \\ 0^2 \end{bmatrix} \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} \begin{array}{l} b_{eq} \text{ power balance jam 1} \\ b_{ineq} \text{ kapasitas saluran} \\ b_{eq}, b_{ineq} \text{ power balance dan} \\ \text{kapasitas saluran jam 2} \\ b_{ineq} \text{ ramp rate jam 1-2} \\ b_{ineq} \text{ charging discharging jam} \\ \text{1 \& 2} \end{array} \quad (3.20)$$

### 3.2.6 Pembentukan Vektor $x_{max}$ dan $x_{min}$ yang Menyatakan Batas Bawah dan Batas Atas

Pembentukan vektor  $x_{max}$  dan  $x_{min}$  harus memenuhi batas atas dan batas bawah yang sesuai dengan ketentuan dari *inequality constraint*.

$$P_{Gh} \min \leq P_{Gh} \leq P_{Gh} \max \quad (3.21)$$

Dengan  $P_G$  min dan  $P_G$  max yang merupakan kapasitas dari pembangkitan minimum dan maksimum dari generator *unit-h*, maka matriks yang bisa dibentuk dari batasan tersebut untuk merepresentasikan nilai  $x_{max}$  dan  $x_{min}$  sebagai *inequality constraint* ada seperti persamaan berikut :

$$x_{max} = \begin{pmatrix} P_{max} \\ P_{max} \\ P_{max} \\ P_{max} \\ P_{max} \\ P_{max} \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

$$x_{min} = \begin{pmatrix} P_{min} \\ P_{min} \\ P_{min} \\ P_{min} \\ P_{min} \\ P_{min} \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

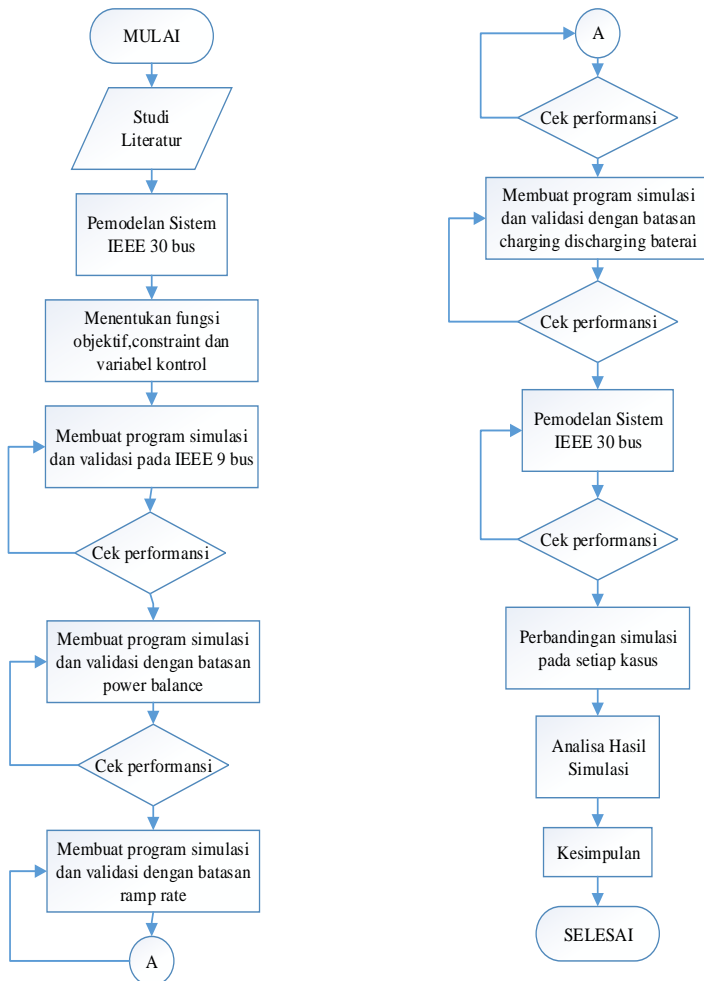
### 3.2.7 Pembentukan dari Vektor $x_0$

Pembentukan vektor  $x_0$  sendiri merepresentasikan variabel control yang didefinisikan sebagai nilai  $x$  dengan nilai awalnya adalah  $x_0$  yang biasa disebut dengan initial point. Pada penelitian ini yang menggunakan *quadratic programming*, vektor  $x_0$  boleh disertakan atau tidak.

## 3.3 Penerapan Algoritma pada *Dynamic Economic Dispatch* Menggunakan *Quadratic Programming*

Pada penelitian ini metode yang digunakan dengan menggunakan *quadratic programming* untuk menyelesaikan permasalahan. Melalui pemodelan sistem yang ada dengan mempertimbangkan *charging* *discharging* pada baterai, proses pengolahan data dan simulasi dapat

dilakukan dengan menggunakan software MATLAB dengan menggunakan file Matpower. Berikut bentuk flowchart dalam menyelesaikan penelitian ini :



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 4

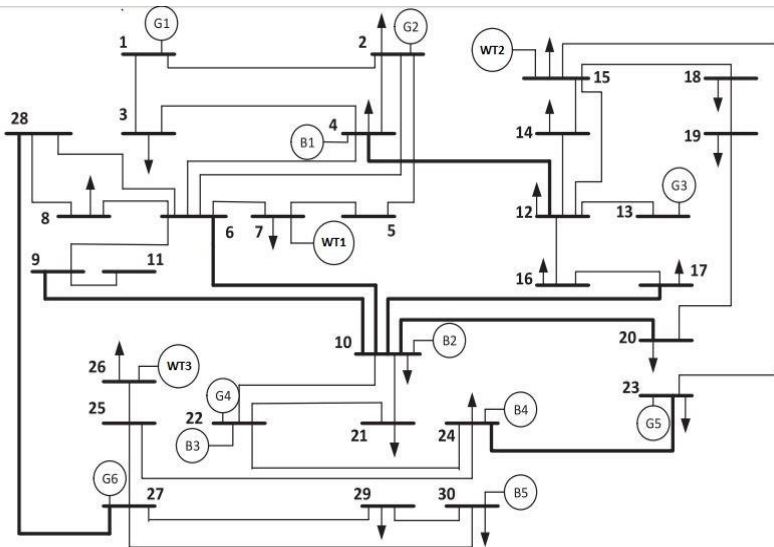
### SIMULASI DAN ANALISA DATA

#### 4.1 Hasil Simulasi

Perhitungan *dynamic economic dispatch* dengan *quadratic programming* akan dibahas dengan mendalam pada bab ini. Beberapa studi kasus akan dijabarkan melalui tabel-tabel berupa data pembangkitan, biaya, dan charging discharging pada baterai. Penambahan *wind turbine* juga akan diperhitungkan pada biaya optimasi dari pembangkitan.

##### 4.1.1 Sistem IEEE 30 bus

Beberapa kasus ini akan dilakukan dengan menggunakan sistem IEEE 30 bus dengan metode penyelesaiannya berupa *quadratic programming* pada *dynamic economic dispatch*. Berikut single line diagram dari sistem IEEE 30 bus pada gambar 4.1 :



Gambar 4. 1 Single Line Diagram 30 Bus

#### 4.1.1.1 Profil Pembangkit

Total generator yang digunakan pada sistem ini sebanyak 6 buah pembangkit dengan masing-masing profil yang berbeda dilihat dari biaya bahan bakarnya. Berikut adalah profil pembangkit yang ada pada sistem IEEE 30 bus :

**Tabel 4. 1 Profil Generator IEEE 30 bus**

Unit	<i>Cost Function</i>	P max (MW)	P min (MW)	Ramp Rate (MW/Jam)
1	$0.02P_1^2 + 2P_1 + 0$	80	0	50
2	$0.0175P_2^2 + 1.75P_2 + 0$	80	0	50
3	$0.025P_3^2 + 3P_3 + 0$	40	0	50
4	$0.0625P_4^2 + P_4 + 0$	50	0	50
5	$0.025P_5^2 + 3P_5 + 0$	40	0	50
6	$0.00834P_6^2 + 3.25P_6 + 0$	55	0	50

#### 4.1.1.2 Profil Pembebanan

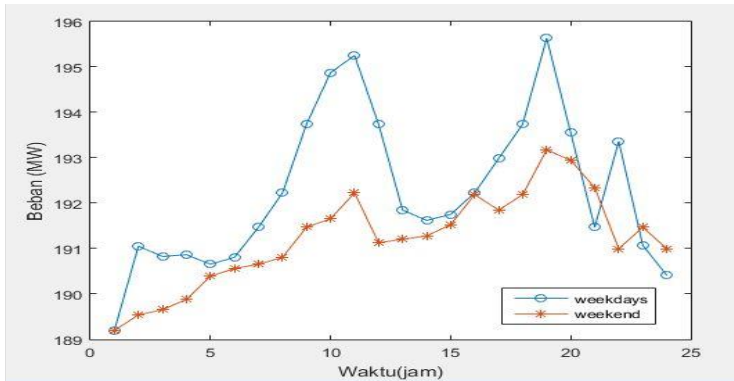
Total beban yang diperoleh adalah selama 24 jam dan terdapat dua profil beban yang digunakan yaitu pada *weekdays* dan *weekend*. Dua perbedaan profil beban ini hanya akan mengetahui perbedaan permintaan beban pada hari biasa dan akhir pekan. Berikut pada tabel 4.2 adalah data pembebanan yang akan digunakan pada penelitian ini :

**Tabel 4. 2 Data Pembebanan**

JAM	Total Beban (MW) <i>Weekdays</i>	Total Beban (MW) <i>Weekend</i>
1	189.2	189.2
2	191.0542	189.5406
3	190.8271	189.65
4	190.865	189.8811
5	190.6568	190.392

**Tabel 4.2** Data Pembebanan (lanjutan)

JAM	Total Beban (MW) <i>Weekdays</i>	Total Beban (MW) <i>Weekend</i>
6	190.8082	190.5622
7	191.4704	190.6568
8	192.2272	190.8082
9	193.7408	191.4704
10	194.876	191.6596
11	195.2544	191.5082
12	193.7408	190.9406
13	191.8488	190.8271
14	191.6218	190.4109
15	191.7542	190.9596
16	192.2272	192.1894
17	192.984	193.7408
18	193.7408	195.822
19	189.8433	191.0731
20	191.8488	191.6785
21	191.4704	190.9596
22	193.3624	190.9974
23	191.0731	191.4704
24	190.4109	190.9974
TOTAL	4606.9066	4589.3847



**Gambar 4. 2** Kurva Beban Selama 24 Jam

Dari data pembebanan yang diperoleh dari tabel diatas, terdapat adanya perbedaan permintaan beban antara *weekdays* dan *weekend*. Untuk permintaan beban pada *weekdays* lebih besar dikarenakan daya tenaga listrik yang digunakan lebih tinggi akibat aktivitas yang sering dilakukan seperti beban yang ada pada industri-industri yang beraktivitas pada hari-hari aktif (*weekdays*).

## 4.2 Studi Kasus

Pada sub-bab ini akan ditampilkan hasil perhitungan dengan berupa tabel-tabel yang meliputi pembebanan, pembangkitan optimal, biaya total dan kapasitas baterai pada berbagai kondisi yang memperhatikan kecepatan angin pada *wind turbine*. Beberapa studi kasus akan dibuat untuk membandingkan pengoptimalan pembangkitan agar diperoleh biaya pembangkitan seminimal mungkin. Adapun studi kasus yang akan dibuat antara lain :

1. Sistem IEEE 30 bus
2. Sistem dengan penambahan *wind turbine*
3. Sistem dengan penambahan *wind turbine* dan media penyimpanan energi

Diasumsikan kondisi beban selama 24 jam dalam penelitian ini berbeda-beda sesuai permintaannya. Dalam studi kasus ini akan diketahui pengaruh penambahan *wind turbine* pada sistem dan baterai dalam pengoptimalan pembangkitan. Beberapa batasan yang ada adalah biaya pemeliharaan *wind turbine* dan baterai diabaikan.



#### 4.2.1 Studi Kasus 1

Studi kasus 1 akan merepresentasikan keadaan sistem IEEE 30 bus yang tidak terhubung dengan *wind turbine* dan baterai dalam periode waktu 24 jam. Terdapat 6 generator yang ditinjau pada studi kasus ini perihal daya pembangkitan dan total biaya pembangkitan dari masing-masing generator. Hasil simulasi berupa data pembebanan, daya yang dibangkitkan dan total biaya pembangkitan akan ditunjukkan pada tabel 4.3 dan 4.4

**Tabel 4. 3** Hasil Simulasi Studi Kasus 1 *Weekdays*

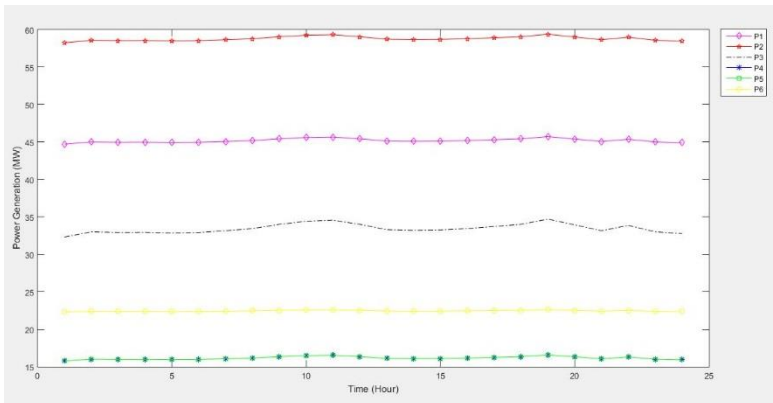
JAM	Total Beban (MW)	Daya yang Dibangkitkan (MW)	Biaya (\$)
1	189.2	189.2	565.21
2	191.0542	191.0542	572.24
3	190.8271	190.8271	571.38
4	190.8649	190.865	571.52
5	190.6568	190.6568	570.73
6	190.8082	190.8082	571.31
7	191.4704	191.4704	573.82
8	192.2272	192.2272	576.71
9	193.7408	193.7408	582.48
10	194.876	194.876	586.81
11	195.2544	195.2544	588.26
12	193.7408	193.7408	582.48
13	191.8488	191.8488	575.26
14	191.6218	191.6218	574.40
15	191.7542	191.7542	574.90
16	192.2272	192.2272	576.71
17	192.984	192.984	579.59

**Tabel 4.3** Hasil Simulasi Studi Kasus 1 Weekdays (lanjutan)

JAM	Total Beban (MW)	Daya yang Dibangkitkan (MW)	Biaya (\$)
18	193.7408	193.7408	582.48
19	189.8433	189.8433	589.71
20	193.5516	193.5516	581.75
21	191.4704	191.4704	573.82
22	193.3624	193.3624	581.75
23	191.0731	191.0731	572.31
24	190.4109	190.4109	569.80

*Total biaya = \$ 13,845.44*

Berikut akan ditampilkan grafik pembangkitan pada tiap-tiap pembangkit selama 24 jam pada gambar 4.3.



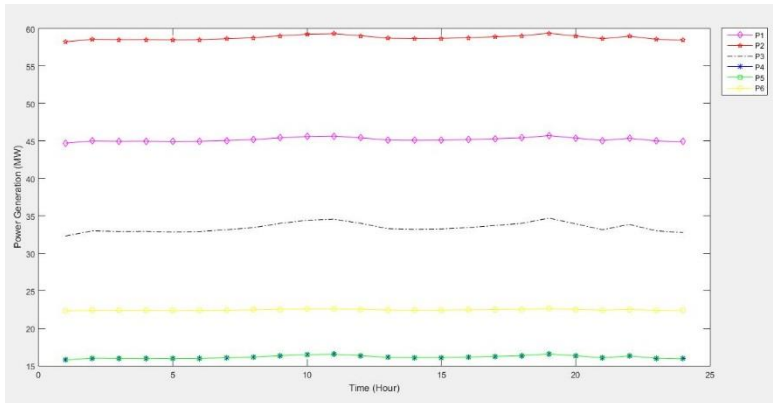
**Gambar 4. 2** Grafik Pembangkitan Studi Kasus 1 Weekdays

**Tabel 4. 4** Hasil Simulasi Kasus 1 *Weekend*

JAM	Total Beban (MW)	Daya yang Dibangkitkan (MW)	Biaya (\$)
1	189.2	189.2	565.21
2	189.5406	189.5406	566.50
3	189.6541	189.6541	566.93
4	189.8811	189.8811	567.79
5	190.392	190.392	569.73
6	190.5622	190.5622	570.37
7	190.6568	190.6568	570.73
8	190.8082	190.8082	571.31
9	191.4704	191.4704	573.82
10	191.6596	191.6596	574.54
11	192.2272	192.2272	576.71
12	191.1298	191.1298	572.53
13	191.2055	191.2055	572.82
14	191.2812	191.2812	573.11
15	191.5272	191.5272	574.04
16	192.1894	192.1894	576.56
17	191.8488	191.8488	575.26
18	192.1894	192.1894	576.56
19	193.1732	193.1732	580.31
20	192.9462	192.9462	579.44
21	192.3407	192.3407	577.14
22	190.9974	190.9974	572.03
23	191.4704	191.4704	573.82
24	190.9974	190.9974	572.03

*Total biaya = \$ 13,749.28*

Berikut akan ditampilkan grafik pembangkitan pada tiap-tiap pembangkit selama 24 jam pada gambar 4.4.



**Gambar 4. 3** Grafik Pembangkitan Studi Kasus 1 *Weekend*

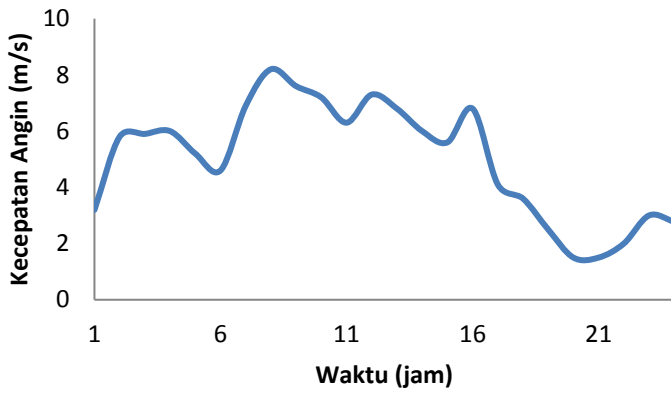
Dari hasil simulasi diperoleh perbedaan total biaya pada *weekdays* dan *weekend* dari pembangkitan 6 generator yang ada pada sistem tersebut. Hal itu dikarenakan permintaan beban pada *weekdays* dan *weekend* yang berbeda. Permintaan beban berbanding lurus dengan biaya pembangkitan dari tiap generator ditinjau dari biaya bahan bakar masing-masing generatornya.

#### 4.2.2 Studi Kasus 2

Pada Studi kasus ini akan ada penambahan *wind turbine* yang terhubung pada sistem sebanyak 3 buah dengan asumsi kecepatan angin yang ada berubah-ubah setiap periode waktunya (24 jam). Data yang dimasukkan menggunakan IEEE 30 bus dengan inputan kecepatan angin pada tabel 4.5 dan hasil simulasi yang diperoleh berupa data pembebanan, daya pembangkitan dan total biaya pembangkitan akan ditunjukkan pada tabel 4.6 dan 4.7

**Tabel 4. 5** Data Masukan Kecepatan Angin

JAM	Kecepatan Angin(m/s)
1	3.2
2	5.8
3	5.9
4	6
5	5.2
6	4.6
7	6.9
8	8.2
9	7.6
10	7.2
11	6.3
12	7.3
13	6.8
14	6
15	5.6
16	6.8
17	4.1
18	3.6
19	2.5
20	1.5
21	1.5
22	2
23	3
24	2.78



**Gambar 4. 5** Gambar Kecepatan Angin

**Tabel 4. 6** Hasil Simulasi Studi Kasus 2 *Weekdays*

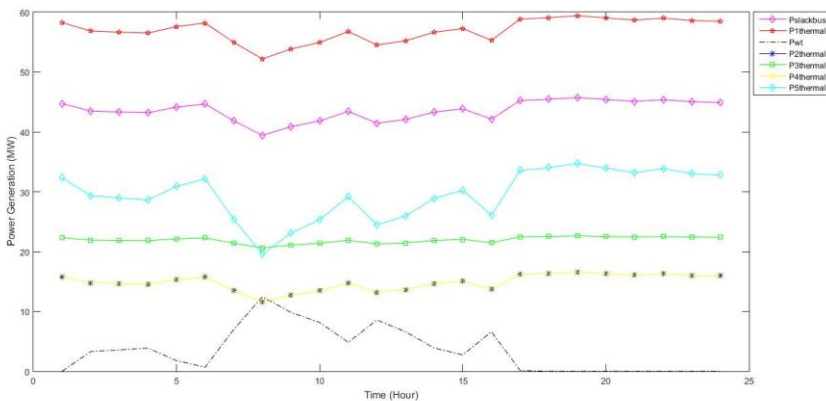
JAM	Total Beban (MW)	Daya <i>Wind turbine</i> (MW)	Biaya (\$)
1	189.2	0	562.21
2	191.0542	9.8688	535.04
3	190.8271	10.7376	530.94
4	190.865	11.64	527.72
5	190.6568	5.3184	550.62
6	190.8082	2.0544	563.52
7	191.4704	20.9664	495.45
8	192.2272	37.3776	438.70
9	193.7408	29.4672	472.68
10	194.876	24.4944	495.00
11	195.2544	14.5152	533.37
12	193.7408	25.7088	486.38
13	191.8488	19.8336	501.00

**Tabel 4.6** Hasil Simulasi Studi Kasus 2 Weekdays (lanjutan)

JAM	Total Beban (MW)	Daya Wind turbine (MW)	Biaya (\$)
14	191.6212	11.64	530.54
15	191.7542	8.2176	543.85
16	192.2272	19.8336	502.40
17	192.984	0.4512	577.87
18	193.7408	0	582.48
19	195.6328	0	589.71
20	193.5516	0	581.75
21	191.4704	0	573.82
22	193.3624	0	581.03
23	191.0731	0	572.31
24	190.4109	0	569.80

*Total Biaya = \$ 12,898.17*

Berikut akan ditampilkan grafik pembangkitan pada tiap-tiap pembangkit ketika adanya penambahan *wind turbine* selama 24 jam pada gambar 4.3.



**Gambar 4. 4** Grafik Pembangkitan Studi Kasus 2 Weekdays

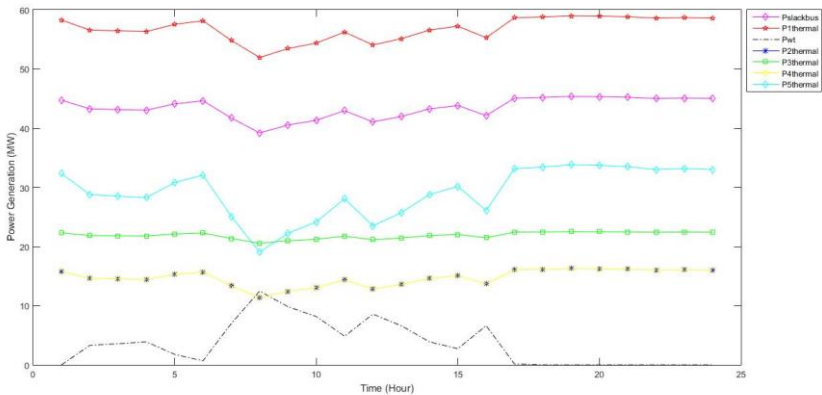
**Tabel 4. 7** Hasil Simulasi Studi Kasus 2 *Weekend*

JAM	Total Beban (MW)	Daya <i>Wind turbine</i> (MW)	Biaya (\$)
1	189.2	0	565.21
2	189.5406	9.8688	529.38
3	189.6541	10.7376	526.57
4	189.8811	11.64	524.05
5	190.392	5.3184	549.62
6	190.5622	2.0544	562.58
7	190.6568	20.9664	492.46
8	190.8082	37.3776	433.63
9	191.4704	29.4672	464.44
10	191.6596	24.4944	483.21
11	192.2272	14.5152	522.08
12	191.1298	25.7088	476.85
13	191.2055	19.8336	498.64
14	191.2812	11.64	529.27
15	191.5272	8.2176	542.99
16	192.1894	19.8336	502.26
17	191.8488	0.4512	573.55
18	192.1894	0	576.56
19	193.1732	0	580.31
20	192.9462	0	579.44
21	192.3407	0	577.14
22	190.9974	0	572.03
23	191.4704	0	573.82
24	190.9974	0	572.03

*Total biaya = \$12,808.13*



Berikut akan ditampilkan grafik pembangkitan pada tiap-tiap pembangkit ketika adanya penambahan *wind turbine* selama 24 jam pada gambar 4.7.



**Gambar 4.5** Grafik Pembangkitan Studi Kasus 2 *Weekend*

Berdasarkan hasil simulasi tersebut dapat diperoleh perbedaan daya pembangkitan ketika ada penambahan pembangkit *renewable* yaitu *wind turbine* sebanyak 3 buah dalam sistem IEEE 30 bus. Kecepatan angin yang berubah-ubah terhadap periode waktu mempengaruhi daya pembangkitan yang ada pada *wind turbine* itu sendiri. Didapatkan total biaya pembangkitan yang lebih murah pada studi kasus 2 dibandingkan studi kasus 1 baik itu pada *weekdays* dan *weekend*. Penambahan *wind turbine* di dalam sistem bertujuan untuk meminimalisir total biaya pembangkitan yang ada pada pembangkit thermal. Dikarenakan pada *wind turbine* sendiri tidak adanya *cost function* ataupun biaya bahan bakar yang dikeluarkan, dengan ketentuan batasan biaya operasi dan maintenance pembangkit *renewable* diabaikan.

### 4.2.3 Studi Kasus 3

Pada studi kasus ini akan ada penambahan media penyimpanan energi (baterai) pada sistem. Melanjutkan yang ada pada studi kasus 2 untuk data masukan pada pembahasan kasus ini, pada studi kasus ini akan mengetahui pengaruh penambahan baterai pada sistem. Dalam penelitian ini akan dibahas mengenai charging discharging baterai yang akan mempengaruhi lifetime dari baterai sendiri. Terdapat total 5 baterai

dengan kapasitas masing-masing sebesar 38.4 MWh yang akan dihubungkan pada sistem. Akan ada beberapa penambahan studi kasus pada sub bab studi kasus 3 ini.

Pada studi kasus 3 ini akan mengetahui kemampuan baterai saat charging discharging. Akan diperoleh total charging dan discharging baterai pada periode waktu 24 jam yang akan menentukan berapa cycle baterai selama periode waktu tersebut. Sebagai masukan untuk studi kasus 3 ini adalah data baterai yang meliputi kapasitas baterai,  $SOC_{max}$ ,  $SOC_{min}$ , dan  $P_{max}$  baterai. Data masukan baterai akan ditunjukkan pada tabel 4.8 dan hasil simulasi yang diperoleh pada studi kasus 3 akan dijelaskan pada tabel 4.9 - 4.12 yang juga meliputi *charging* dan *discharging* baterai.

**Tabel 4. 8** Data Masukan Baterai

	Case	Data Baterai (MWh)
$SOC_{max}$	100%	
$SOC_{min}$	20%	
$SOC_{awal}$	20%	
$E_{max}$	3840Wh	38.4
$E_{min}$	768Wh	7.68
$E_o$	768Wh	7.68
$P_{chmax}$		7.68
$P_{dismax}$		3.84
Kapasitas baterai	38.4	

**Tabel 4. 9** Hasil Simulasi Studi Kasus 3 Weekdays

JAM	Total Beban (MW)	Daya Wind turbine (MW)	Daya Baterai (MW)	SOC Baterai (MWh)	Biaya (\$)
1	189.2	0	0	38.4000	565.21
2	191.0542	9.8688	-1.7336	40.1336	541.53
3	190.8271	10.7376	-2.8288	42.9624	541.53
4	190.865	11.64	-3.6933	46.6557	541.53

**Tabel 4. 9** Hasil Simulasi Studi Kasus 3 *Weekdays* (lanjutan)

JAM	Total Beban (MW)	Daya <i>Wind turbine</i> (MW)	Daya Baterai (MW)	SOC Baterai (MWh)	Biaya (\$)
5	190.6568	5.3184	2.4202	44.2356	541.53
6	190.8082	2.0544	5.8356	38.4000	541.53
7	191.4704	20.9664	-10.5228	48.9228	534.44
8	192.2272	37.3776	-26.1772	75.0999	534.44
9	193.7408	29.4672	-16.7532	91.8531	534.44
10	194.876	24.4944	-10.6452	102.4983	534.44
11	195.2544	14.5152	-0.2876	102.7859	534.44
12	193.7408	25.7088	-12.9948	115.7806	534.44
13	191.8488	19.8336	-9.0116	124.7922	534.44
14	191.6218	11.64	-1.0450	125.8372	534.44
15	191.7542	8.2176	2.5098	123.3274	534.44
16	192.2272	19.8336	-8.6332	131.9606	534.44
17	192.984	0.4512	11.5060	120.4546	534.44
18	193.7408	0	12.7140	107.7405	534.44
19	195.6328	0	14.6060	93.1345	534.44
20	193.5516	0	12.5248	80.6097	534.44
21	191.4704	0	10.4436	70.1660	534.44
22	193.3624	0	12.3356	57.8304	534.44
23	191.07308	0	10.0463	47.7841	534.44
24	190.41088	0	9.3841	38.4000	534.44

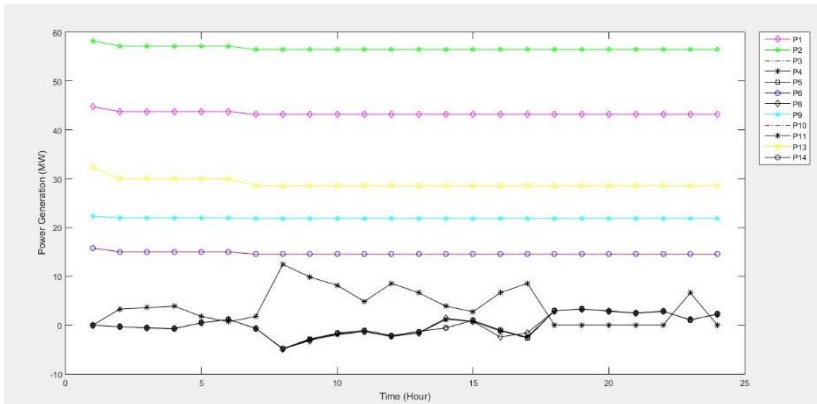
*Keterangan :*

(-) *charging*

(+) *discharging*

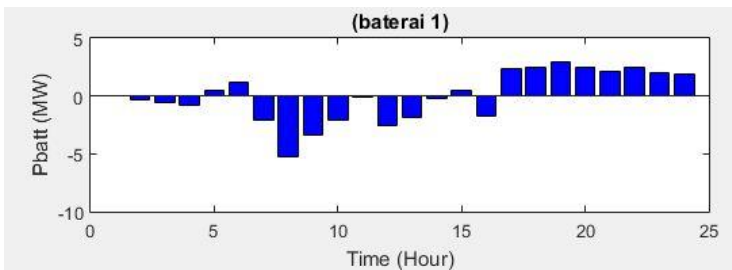
*Total Biaya = \$ 12,892.81*

Berikut akan ditampilkan grafik pembangkitan pada tiap-tiap pembangkit ketika adanya penambahan *wind turbine* dan media penyimpanan energi selama 24 jam pada gambar 4.8.

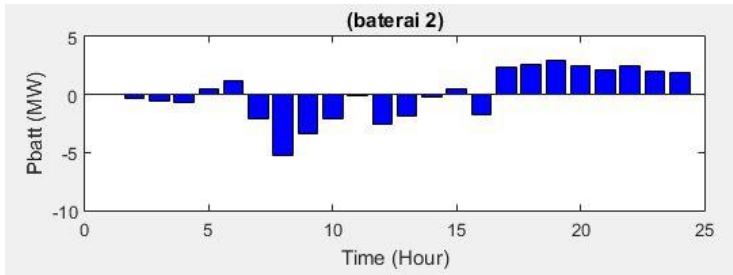


**Gambar 4. 8** Grafik Pembangkitan Studi Kasus 3 Weekdays

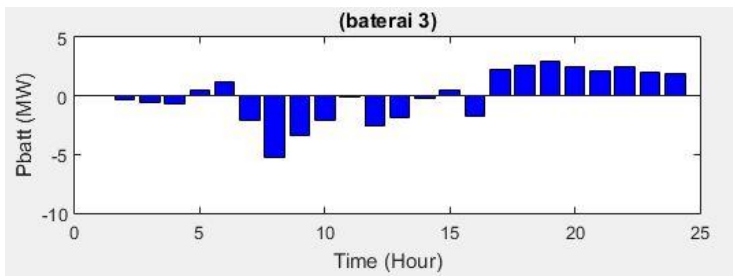
Berikut akan ditampilkan plot *charging* dan *discharging* pada baterai pada periode waktu (*weekdays*) :



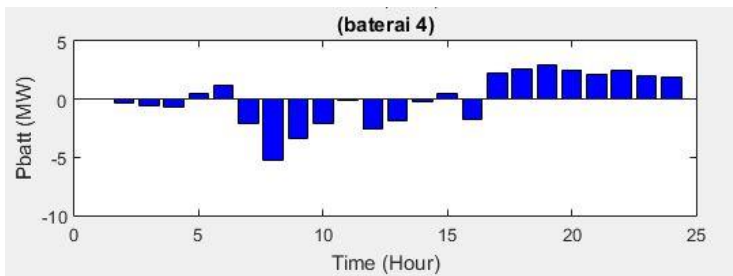
**Gambar 4. 9** Charging Discharging Baterai 1 Weekdays



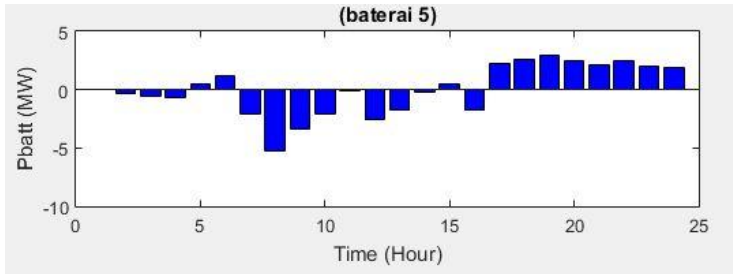
**Gambar 4. 10** *Charging Discharging Baterai 2 Weekdays*



**Gambar 4. 11** *Charging Discharging Baterai 3 Weekdays*



**Gambar 4. 12** *Charging Discharging Baterai 4 Weekdays*



**Gambar 4. 13** Charging Discharging Baterai 5 Weekdays

**Tabel 4. 10** Charging Discharging Baterai Weekdays

JAM	BATERAI				
	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	-0.3507	-0.3480	-0.3437	-0.3501	-0.3412
3	-0.5720	-0.5660	-0.5613	-0.5695	-0.5600
4	-0.7455	-0.7393	-0.7345	-0.7412	-0.7329
5	0.4895	0.4845	0.4799	0.4883	0.4779
6	1.1786	1.1688	1.1596	1.1725	1.1561
7	-2.1132	-2.1080	-2.1001	-2.1114	-2.0902
8	-5.2413	-5.2413	-5.2364	-5.2380	-5.2201
9	-3.3556	-3.3614	-3.3563	-3.3544	-3.3255
10	-2.1303	-2.1400	-2.1372	-2.1324	-2.1052
11	-0.0576	-0.0646	-0.0634	-0.0600	-0.0419
12	-2.6016	-2.6077	-2.6039	-2.6006	-2.5810
13	-1.8050	-1.8057	-1.8024	-1.8031	-1.7953
14	-0.2150	-0.2089	-0.2048	-0.2094	-0.2069
15	0.4951	0.5053	0.5090	0.5019	0.4985
16	-1.7109	-1.6982	-1.7139	-1.7156	-1.7946
17	2.3087	2.3049	2.2988	2.3010	2.2926
18	2.5339	2.5423	2.5479	2.5442	2.5457
19	2.9210	2.9218	2.9216	2.9224	2.9193
20	2.5094	2.5083	2.5042	2.5073	2.4956

**Tabel 4. 10** *Charging Discharging Baterai Weekdays (lanjutan)*

JAM	BATERAI				
	1	2	3	4	5
21	2.0990	2.0954	2.0869	2.0917	2.0705
22	2.4733	2.4702	2.4656	2.4684	2.4582
23	2.0170	2.0123	2.0068	2.0107	1.9995
24	1.8731	1.8752	1.8777	1.8773	1.8808

**Tabel 4. 11** Hasil Simulasi Studi Kasus 3 *Weekend*

JAM	Total Beban (MW)	Daya Wind turbine (MW)	Daya Baterai (MW)	SOC Baterai (MWh)	Biaya (\$)
1	189.2	0	0	38.4000	565.21
2	189.5406	9.8688	-3.2282	41.6282	538.39
3	189.6541	10.7376	0.1035	41.5247	538.39
4	189.8811	11.64	-4.6582	46.1829	538.39
5	190.392	5.3184	2.1743	44.0086	538.39
6	190.5622	2.0544	5.6086	38.4000	538.39
7	190.6568	20.9664	-10.1770	48.5770	530.11
8	190.8082	37.3776	-26.4368	75.0138	530.11
9	191.4704	29.4672	-17.8642	92.8780	530.11
10	191.6596	24.4944	-12.7022	105.5802	530.11
11	192.2272	14.5152	-2.1554	107.7356	530.11
12	191.1298	25.7088	-14.4464	122.1819	530.11
13	191.2055	19.8336	-8.4955	130.6774	530.11
14	191.2812	11.64	-0.2262	130.9036	530.11
15	191.5272	8.2176	3.4422	127.4614	530.11
16	192.1894	19.8336	-7.5116	134.9731	530.11
17	191.8488	0.4512	11.5302	123.4429	530.11
18	192.1894	0	12.3220	111.1209	530.11
19	193.1732	0	13.3058	97.8151	530.11
20	192.9462	0	13.0788	84.7363	530.11
21	192.3407	0	12.4733	72.2630	530.11

**Tabel 4. 11** Hasil Simulasi Studi Kasus 3 *Weekend* (lanjutan)

JAM	Total Beban (MW)	Daya <i>Wind turbine</i> (MW)	Daya Baterai (MW)	SOC Baterai (MWh)	Biaya (\$)
22	190.9974	0	11.1300	61.1330	530.11
23	191.4704	0	11.6030	49.5300	530.11
24	190.9974	0	11.1300	38.4000	530.11

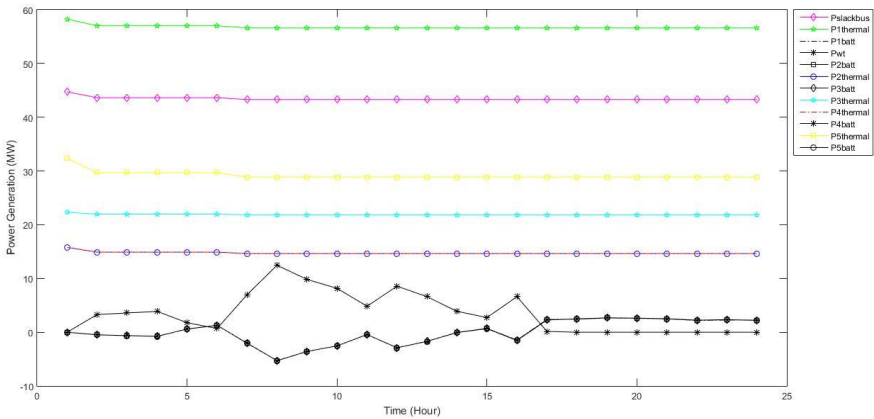
*Keterangan :*

(-) *charging*

(+) *discharging*

*Total Biaya = \$ 12,799.19*

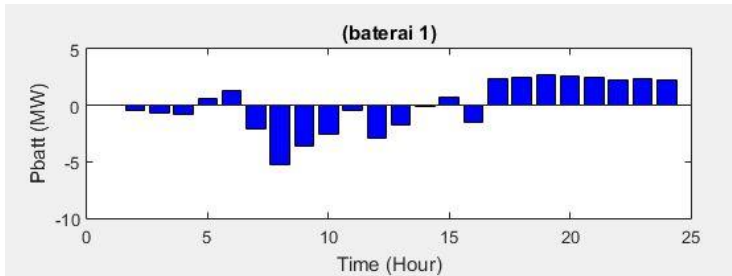
Berikut akan ditampilkan grafik pembangkitan pada tiap-tiap pembangkit ketika adanya penambahan *wind turbine* dan media penyimpanan energi selama 24 jam pada gambar 4.14.



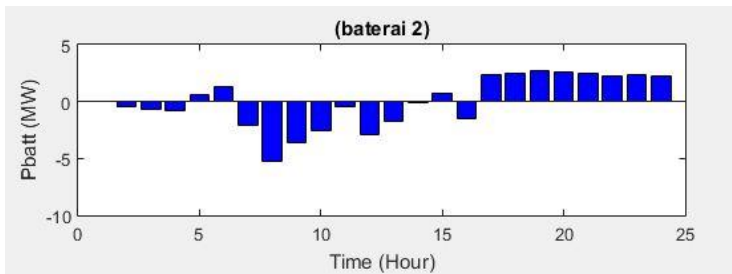
**Gambar 4. 6** Grafik Pembangkitan Studi Kasus 3 *Weekend*



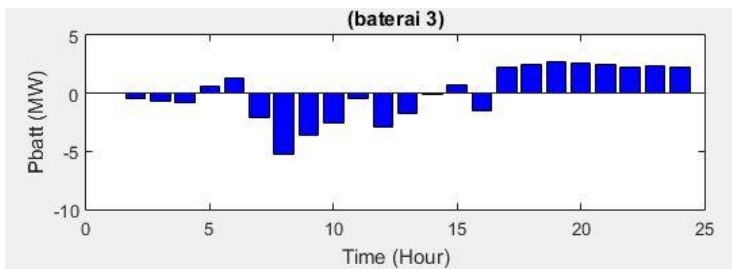
Berikut akan ditampilkan plot *charging* dan *discharging* baterai pada periode waktu (*weekend*) :



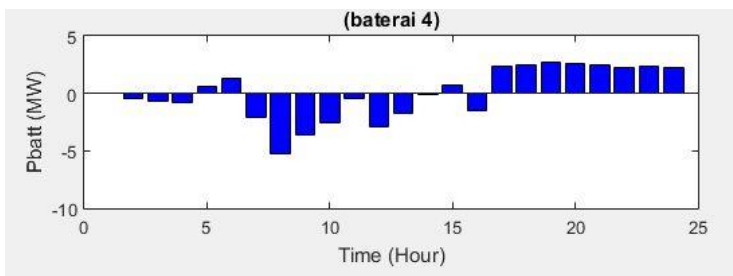
**Gambar 4. 15** *Charging Discharging Baterai 1 Weekend*



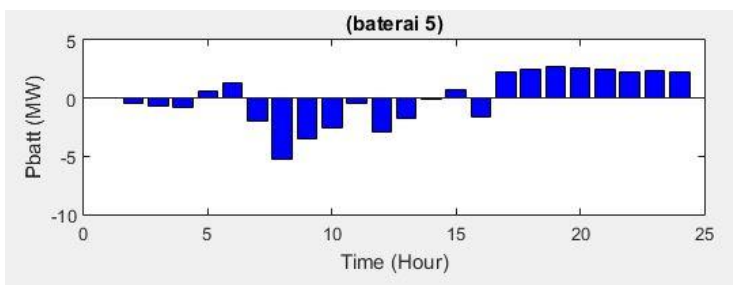
**Gambar 4. 16** *Charging Discharging Baterai 2 Weekend*



**Gambar 4. 17** *Charging Discharging Baterai 3 Weekend*



**Gambar 4. 18** *Charging Discharging Baterai 4 Weekend*



**Gambar 4. 19** *Charging Discharging Baterai 5 Weekend*

**Tabel 4. 12** *Charging Discharging Baterai Weekend*

JAM	BATERAI				
	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	-0.6571	-0.6474	-0.6374	-0.6531	-0.6333
3	0.0242	0.0216	0.0188	0.0230	0.0158
4	-0.9410	-0.9325	-0.9252	-0.9359	-0.9236
5	0.4404	0.4352	0.4305	0.4390	0.4292
6	1.1335	1.1230	1.1133	1.1270	1.1118
7	-2.0435	-2.0390	-2.0314	-2.0417	-2.0212
8	-5.2940	-5.2937	-5.2881	-5.2902	-5.2708
9	-3.5800	-3.5846	-3.5780	-3.5767	-3.5449
10	-2.5443	-2.5529	-2.5483	-2.5440	-2.5127
11	-0.4319	-0.4395	-0.4376	-0.4336	-0.4127
12	-2.8929	-2.8980	-2.8936	-2.8907	-2.8711

**Tabel 4. 12** *Charging Discharging Baterai Weekend* (lanjutan)

JAM	BATERAI				
	1	2	3	4	5
13	-1.7025	-1.7020	-1.6982	-1.7001	-1.6928
14	-0.0518	-0.0448	-0.0404	-0.0459	-0.0433
15	0.6809	0.6917	0.6960	0.6878	0.6857
16	-1.4880	-1.4748	-1.4894	-1.4929	-1.5664
17	2.3138	2.3101	2.3037	2.3058	2.2969
18	2.4544	2.4641	2.4703	2.4661	2.4671
19	2.6616	2.6627	2.6616	2.6630	2.6569
20	2.6195	2.6187	2.6152	2.6178	2.6075
21	2.5007	2.4987	2.4936	2.4966	2.4836
22	2.2360	2.2312	2.2236	2.2277	2.2114
23	2.3277	2.3237	2.3185	2.3224	2.3106
24	2.2344	2.2284	2.2225	2.2286	2.2160

Dari hasil simulasi studi kasus 3 yang terdapat penambahan media penyimpanan energi pada sistem, didapatkan perubahan biaya pembangkitan yang tidak terlalu signifikan dengan studi kasus 2. Hal ini dikarenakan tidak adanya biaya bahan bakar yang ada pada baterai sehingga biaya pembangkitan hanya ada pada pembangkit thermal yang ada pada sistem. Namun, dapat dilihat proses charging discharging baterai pada saat *weekdays* dan *weekend* mengalami perbedaan. Perbedaan tersebut dikarenakan total pembebanan yang berbeda pada dua periode waktu tersebut dan hal itu juga mempengaruhi daya baterai pada setiap jamnya.

### 4.3 Analisa Hasil Simulasi

Pada sub bab analisa hasil simulasi akan menjelaskan terkait total biaya pembangkitan dan *charging discharging* pada Baterai.

#### 4.3.1 Total Biaya Pembangkitan

Dari perhitungan dengan tiga studi kasus yang berbeda, diperoleh total biaya pembangkitan yang berbeda-beda antara studi kasus 1, 2 dan 3. Total biaya dari hasil simulasi menggunakan Matpower pada MATLAB akan ditunjukkan pada tabel 4.12 :

**Tabel 4. 13** *Cost Function* Hasil Simulasi

Cost (\$)	Sistem IEEE 30 bus					
	Wind Turbine	Baterai	Wind turbine	Baterai	Wind turbine	Baterai
	No	No	Yes	No	Yes	Yes
<i>Weekdays</i>	\$13,845.44		\$12,898.17		\$12,892.81	
<i>Weekend</i>	\$13,749.28		\$12,808.13		\$12,799.19	

Dengan penambahan *wind turbine* pada studi kasus 2 dan pada studi kasus 3 penambahan *wind turbine* dan baterai, jelas diperoleh *cost function* hasil simulasi dari periode waktu *weekdays* dan *weekend* menjadi lebih murah. Hal ini dikarenakan tidak adanya biaya bahan bakar dari *wind turbine* dan *baterai* ataupun biaya maintenance dari kedua pembangkit tersebut. Berbeda dengan pembangkit thermal berjumlah 6 buah yang memiliki karakteristik yang berbeda-beda dilihat dari biaya bahan bakar dari masing-masing pembangkit.

#### 4.3.2 *Charging Discharging* pada Baterai

Dari hasil simulasi diperoleh data charging discharging baterai terhadap periode waktu 24 jam dan pada saat *weekday/weekend*. Total *charging/discharging* untuk tiap baterainya yang akan menentukan total *cycle* baterai selama pemakaiannya. Dan berikut adalah hasil dari simulasi pada baterai yang ditunjukkan pada tabel 4.14 :

**Tabel 4. 14** Data Cycle Baterai

	Case	
	<i>Weekend</i>	<i>Weekdays</i>
Total charging/batt	20.79	21.49

**Tabel 4. 14 Data Cycle Baterai (lanjutan)**

Total discharging/batt	20.801	21.501
Cycle/day	0.54	0.56
Years	7.43	

Hasil simulasi diatas diperoleh bahwa pada studi kasus yang ada pada baterai terkait kapasitas baterai, terdapat perbedaan *cycle* baterai di setiap simulasi pada *weekdays* dan *weekend*. Hal tersebut dikarenakan pengaruh dari total *charging discharging* baterai terhadap permintaan beban yang ada. Dan hal tersebut mempengaruhi *state of charge (SOC)* pada baterai untuk setiap periode waktunya. Dan diperoleh hasil akumulasi selama per pekan untuk total *cycle* baterai seumur hidup (sekali pemakaian baterai) dari tabel 4.14 adalah dalam kurun waktu sekitar 7.43 tahun (*lifetime* baterai).

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil simulasi dari penelitian ini dengan menggunakan *quadratic programming* pada analisis *dynamic economic dispatch* dalam suatu sistem IEEE 30 bus dengan variasi penambahan pembangkit *renewable (wind turbine)* dan media penyimpanan energi (baterai) diperoleh beberapa kesimpulan adalah sebagai berikut :

1. Dengan *quadratic programming* dapat diperoleh hasil yang paling minimal pada pembangkitan dengan menentukan pembebanan pada tiap pembangkit.
2. Penambahan adanya *wind turbine* dan baterai dapat memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap perhitungan total biaya pembangkitan
3. Dapat menghemat sekitar 7% dari total biaya pembangkitan ketika sistem ditambahkan *wind turbine* dan baterai, baik itu saat *weekdays* ataupun *weekend*
4. Dengan penggunaan baterai dengan total pembebanan yang berbeda pada *weekdays* dan *weekend* akan didapatkan bahwa total pembebanan saat *weekdays* akan membuat *cycle* baterai lebih kecil dibandingkan total pembebanan saat *weekend*. Hal ini dikarenakan total pembebanan berbanding lurus dengan *cycle* yang ada pada baterai (kapasitas baterai).

#### **5.2 Saran**

1. Untuk penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan *optimal power flow* sehingga dapat diketahui kapasitas saluran dan aliran daya pada tiap saluran.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk penjadwalan suatu pembangkit atau *unit commitment* agar diperoleh hasil yang mendekati keadaan real
3. Perlu dikembangkan lebih lanjut sistem yang terhubung dengan jala-jala PLN.
4. Perlu tambahan adanya biaya operasi dan *maintenance* pada *wind turbine* dan baterai agar biaya yang diperoleh lebih jelas apabila dibandingkan dengan sistem awal.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## DAFTAR PUSTAKA

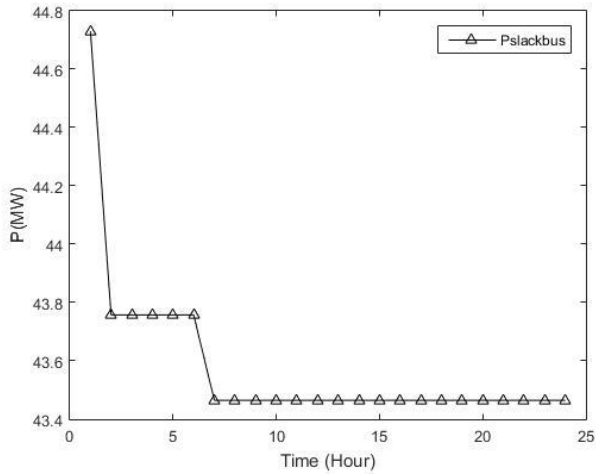
- [1] E. S. Matee and G. Radman, "Determination of optimum economic power commitment by wind farms equipped with energy storage system," in *SOUTHEASTCON 2014, IEEE*, 2014, pp. 1–6.
- [2] W. Liu, Z. Luan, Y. Yang, R. Gan, and H. Zhao, "The application of the improved Particle Swarm Optimization on dynamic economic dispatch of power system with wind farms," in *TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference*, 2015, pp. 1–6.
- [3] N. Yan, Z. X. Xing, W. Li, and B. Zhang, "Economic Dispatch Application of Power System With Energy Storage Systems," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 7, pp. 1–5, Oct. 2016.
- [4] L. Xiaoping, D. Ming, H. Jianghong, H. Pingping, and P. Yali, "Dynamic economic dispatch for microgrids including battery energy storage," in *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2010 2nd IEEE International Symposium on*, 2010, pp. 914–917.
- [5] Y. Zhang, N. Rahbari-Asr, J. Duan, and M.-Y. Chow, "Day-Ahead Smart Grid Cooperative Distributed Energy Scheduling With Renewable and Storage Integration," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1739–1748, Oct. 2016.
- [6] N. Yan, Z. X. Xing, W. Li, and B. Zhang, "Economic dispatch analysis of wind power integration into power system with energy storage systems," in *Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), 2015 IEEE International Conference on*, 2015, pp. 141–142.
- [7] C.-L. Nguyen, T.-W. Chun, and H.-H. Lee, "Determination of the optimal battery capacity based on a life time cost function in wind farm," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE*, 2013, pp. 51–58.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

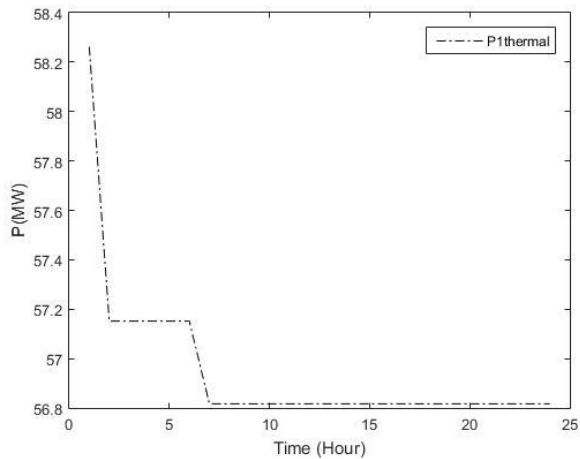
## LAMPIRAN

### 1. Daya yang dibangkitkan saat *weekdays* (studi kasus 3)

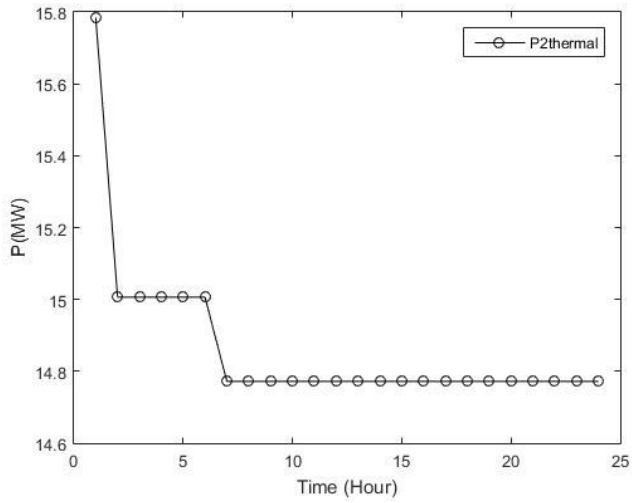
Gambar 1.1 Pslackbus *weekdays*



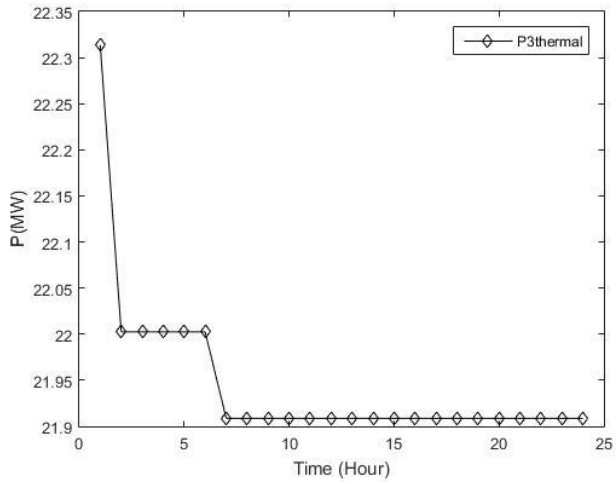
Gambar 1.2 P1thermal *weekdays*



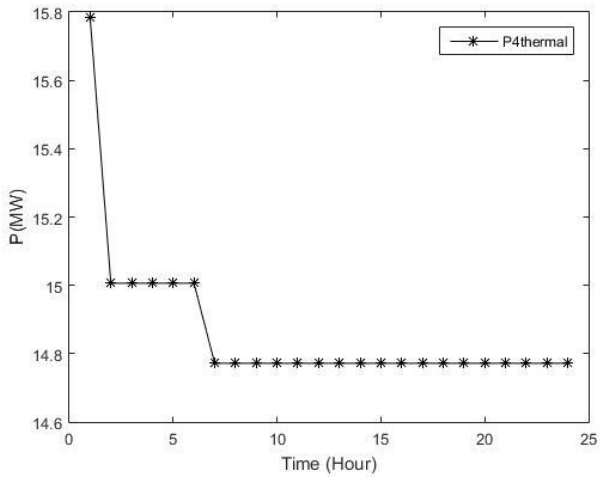
Gambar 1.3 P2thermal weekdays



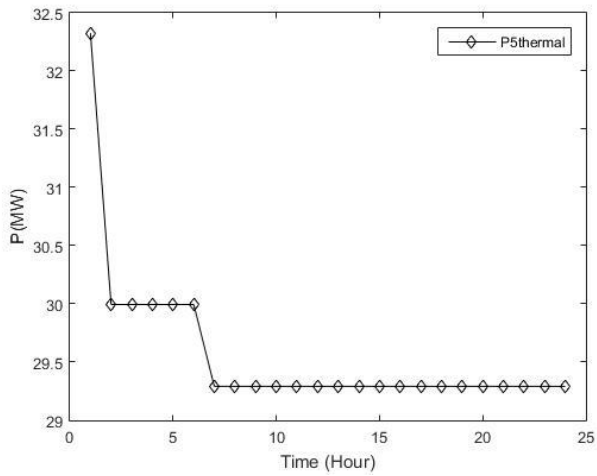
Gambar 1.4 P3thermal weekdays



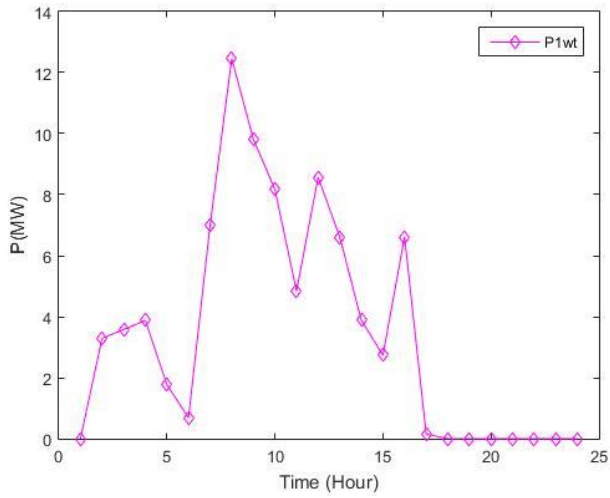
Gambar 1.5 P4thermal weekdays



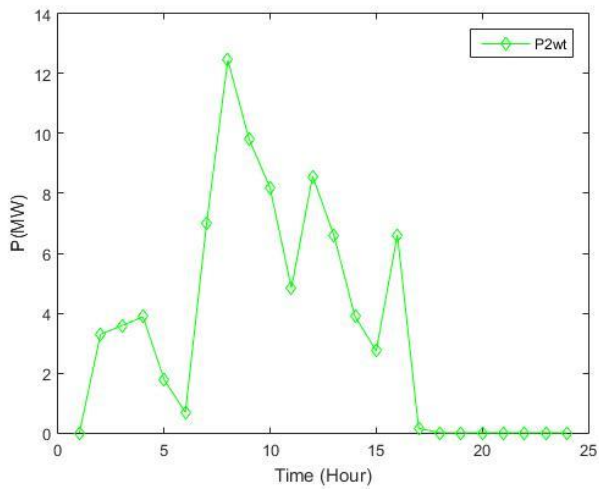
Gambar 1.6 P5thermal weekdays



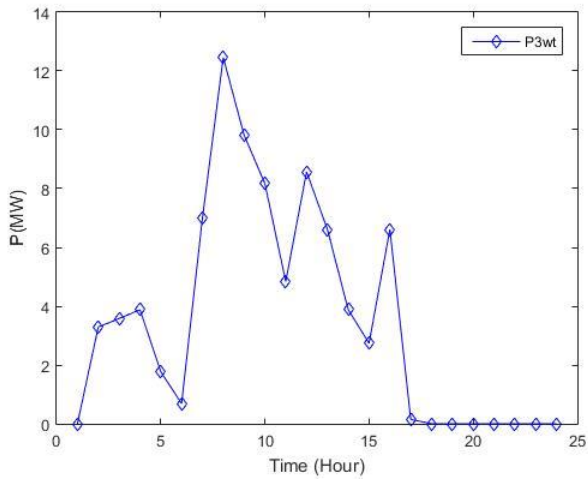
Gambar 1.7 P1wt weekdays



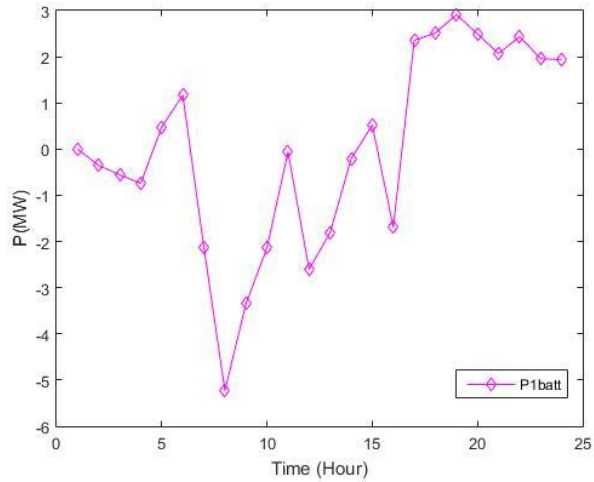
Gambar 1.8 P2wt weekdays



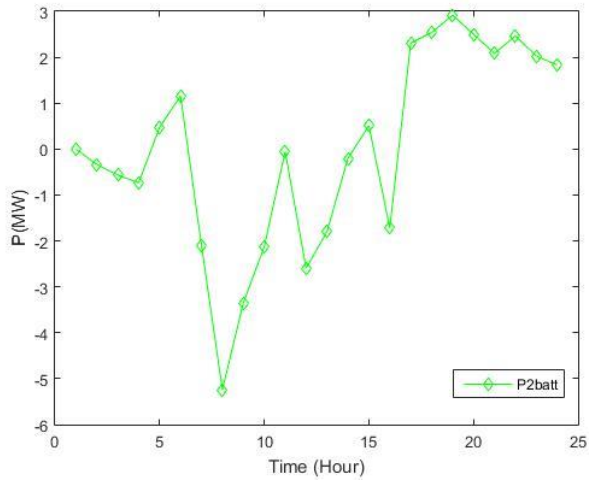
Gambar 1.9 P3wt weekdays



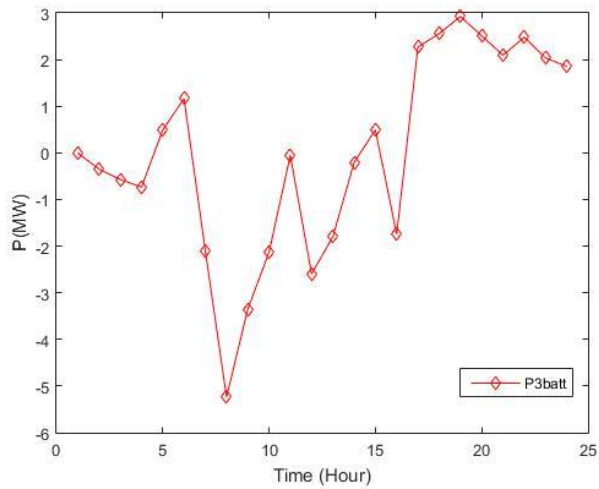
Gambar 1.10 P1batt weekdays



Gambar 1.11 P2batt weekdays

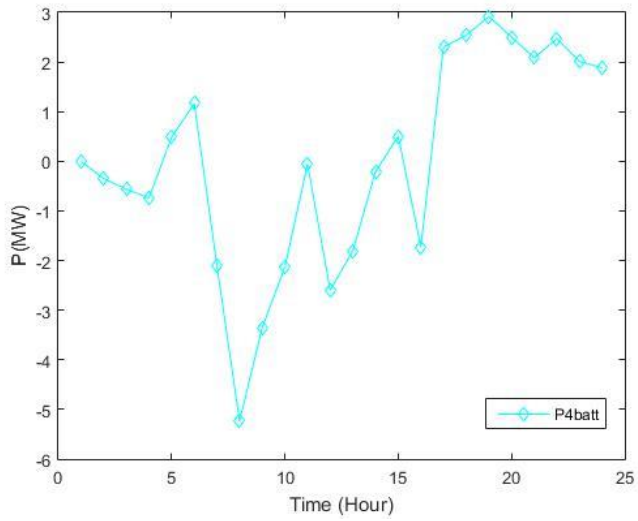


Gambar 1.12 P3batt weekdays

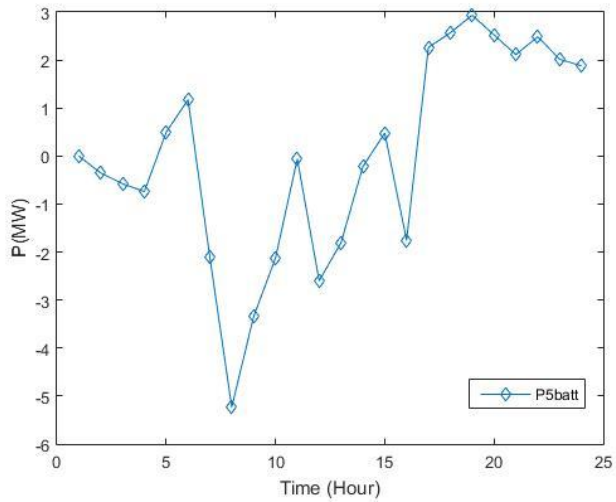




Gambar 1.13 P4batt weekdays

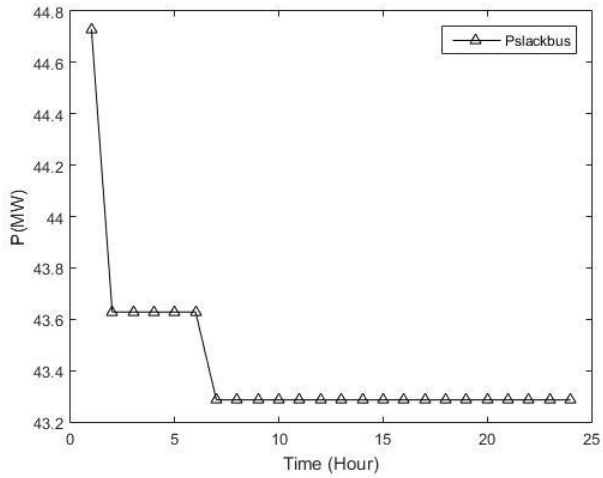


Gambar 1.14 P5batt weekdays

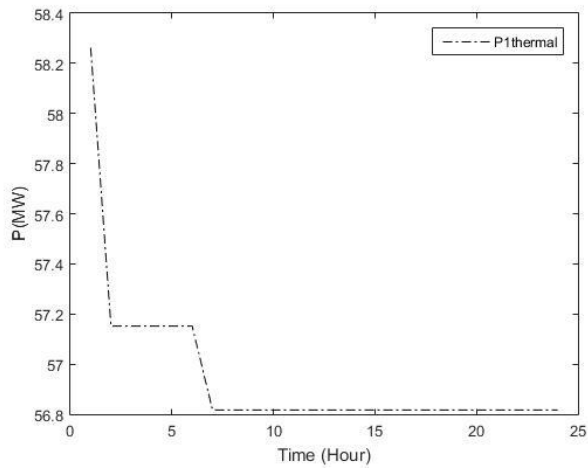


## 2. Daya yang dibangkitkan saat *weekend* (studi kasus 3)

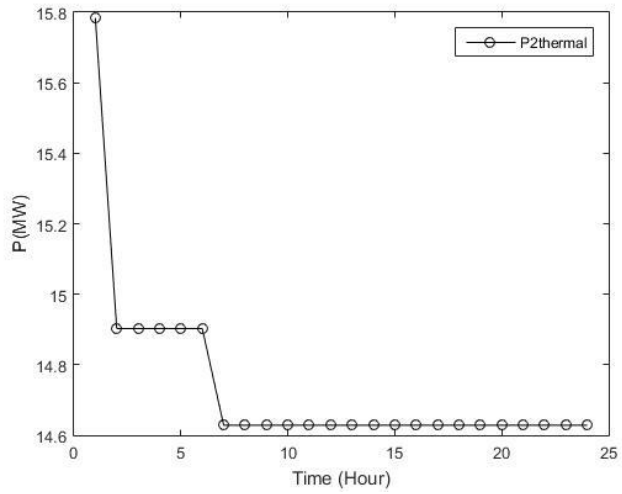
Gambar 2.1 P slack bus *weekend*



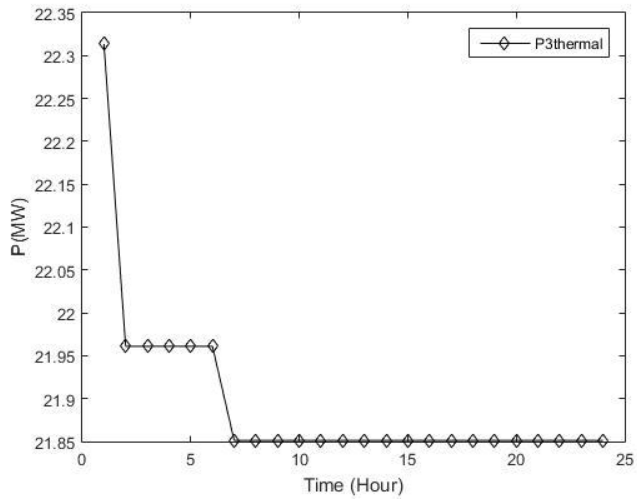
Gambar 2.2 P1thermal *weekend*



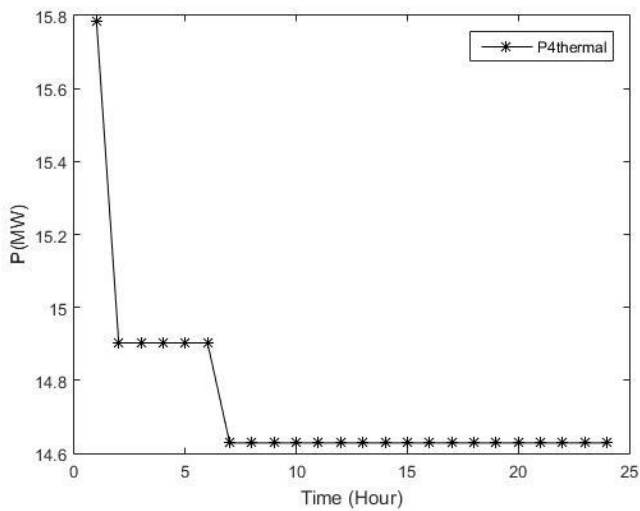
Gambar 2.3 P2thermal weekend



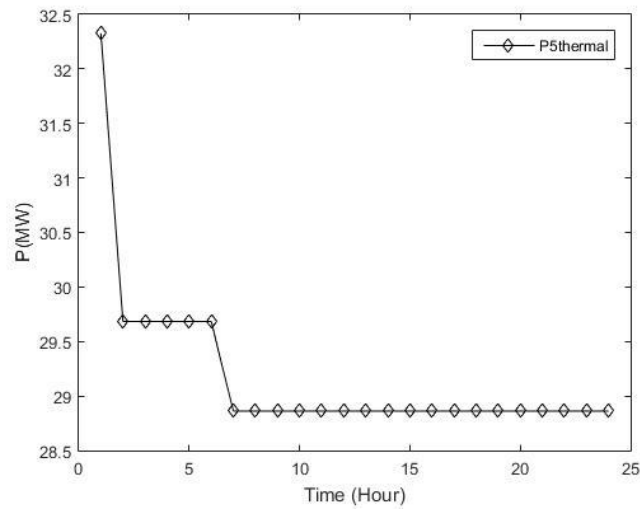
Gambar 2.4 P3thermal weekend



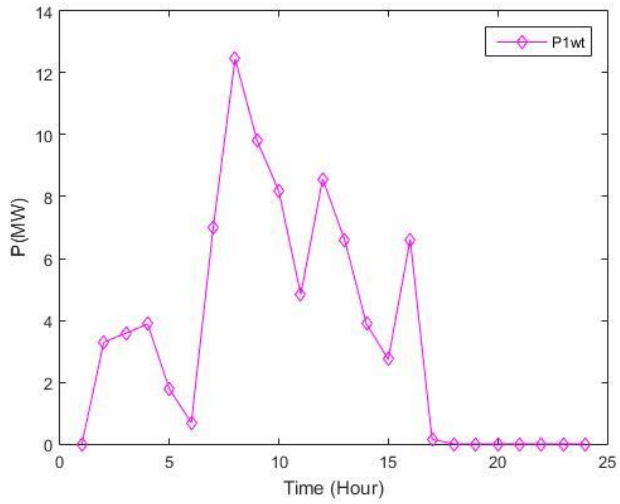
Gambar 2.5 P4thermal weekend



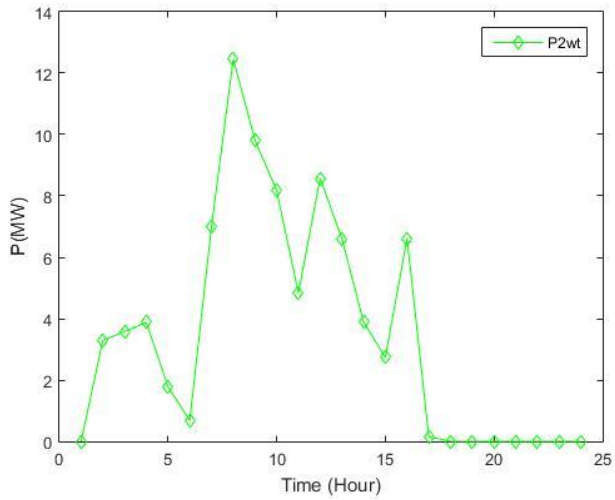
Gambar 2.6 P5thermal weekend



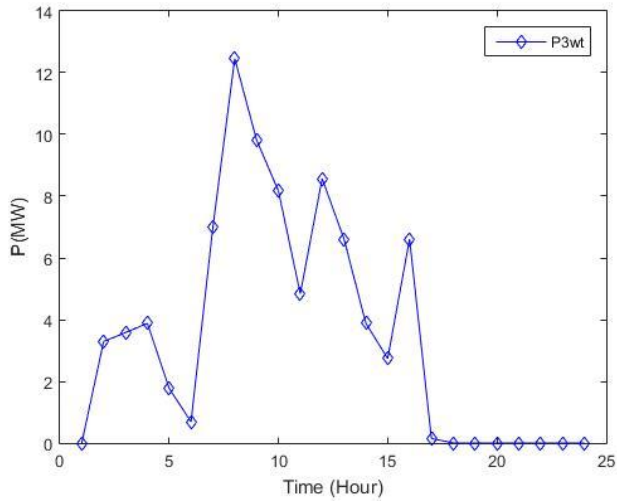
Gambar 2.7 P1wt weekend



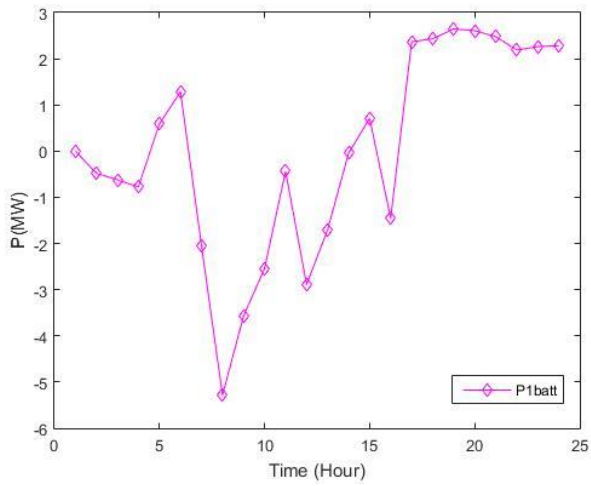
Gambar 2.8 P2wt weekend



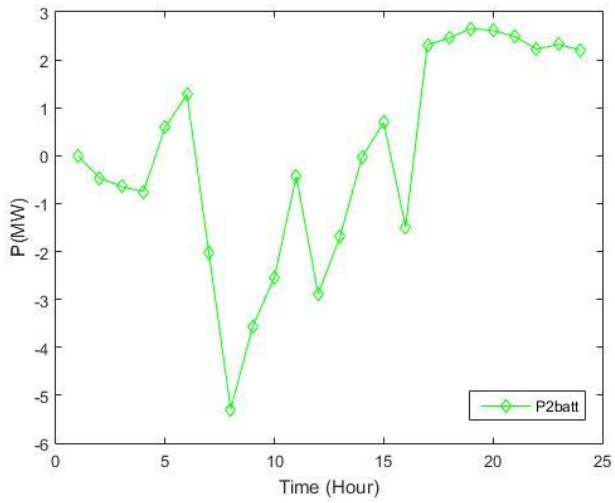
Gambar 2.9 P3wt weekend



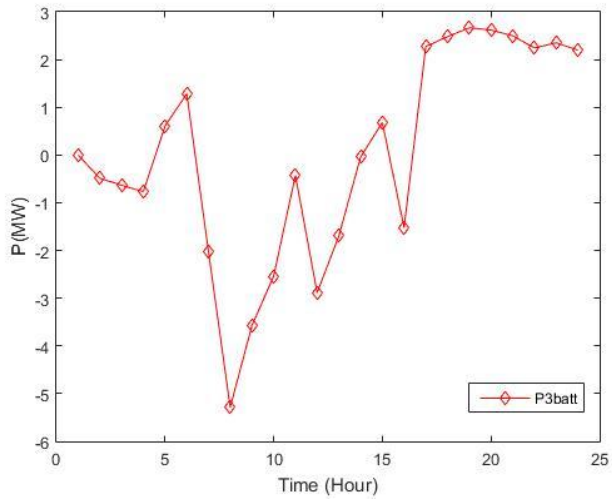
Gambar 2.10 P1batt weekend



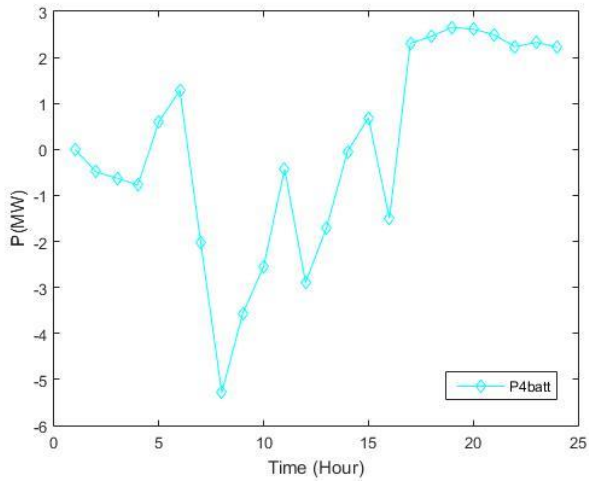
Gambar 2.11 P2batt weekend



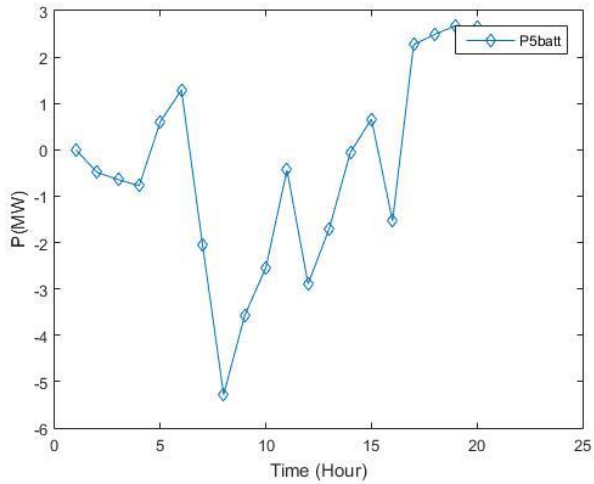
Gambar 2.12 P3thermal weekend



Gambar 2.13 P4batt weekend



Gambar 2.14 P5batt weekend





## BIODATA PENULIS



Galih Budi Virgiansyah lahir pada tanggal 6 September 1995 di Kota Surabaya. Anak pertama dari dua bersaudara oleh pasangan Eko Budi Harsono dan Dwi Budi Lestyawati. Penulis menamatkan jenjang pendidikannya mulai dari sekolah dasar di SDN Ketabang V Surabaya pada tahun 2007, menengah pertama di SMP Negeri 1 Surabaya pada tahun 2010, menengah atas di SMA Negeri 6 Surabaya pada tahun 2012. Dan saat ini sedang menenpuh kuliah di Departemen Teknik Elektro FTE-ITS sejak tahun 2013.

Karena aktif dalam kegiatan non akademik, penulis pernah menjadi Ketua BEM FTI-ITS pada periode 2015-2016. Penulis juga hobi berolahraga seperti basket dan futsal. Karena kesukaannya pada olahraga basket, penulis pernah mampu membawa tim basket FTI putra menjadi juara DIES NATALIS 54 ITS di tahun 2014 untuk pertama kalinya dan membawa tim basket Teknik Elektro mampu menjadi juara 3 pada ITS Basketball League (IBL) di tahun 2017.

Penulis dapat dihubungi melalui email : ***galihbudiv.7@gmail.com***